

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**



**TESIS DOCTORAL**

**Adsorción de mezclas gaseosas multicomponentes :  
determinación experimental y predicción teórica de sus  
datos de equilibrio**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
PRESENTADA POR

**Carlos Marrón Taranco**

DIRECTOR:

**Enrique Costa Novella**

**Madrid, 2015**

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA**

T1

66.0

MAR



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE



5322345313

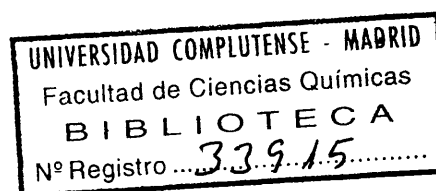
**ADSORCION DE MEZCLAS GASEOSAS  
MULTICOMPONENTES: DETERMINACION  
EXPERIMENTAL Y PREDICCION TEORICA  
DE SUS DATOS DE EQUILIBRIO**

**MEMORIA**

Que para optar al Grado de  
Doctor en Ciencias Químicas

**P R E S E N T A**

**CARLOS MARRON TARANCO**



**Madrid, 1979**

## RECONOCIMIENTO

La presente investigación se realizó en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Complutense de Madrid, bajo la dirección del Catedrático D. Enrique Costa Novella, a quien deseo testimoniar, desde aquí, mi profundo agradecimiento por su magisterio y su ayuda.

También he de expresar mi gratitud a D. Francisco Domingo Rodríguez y D. Luis Lovaco Werz, a mis compañeros de Departamento y a todas aquellas personas que con su ayuda contribuyeron a la realización de este trabajo.

Así mismo, he de citar al Claustro de Profesores de la Facultad de Química de la Universidad Complutense de Madrid, al que debo mi formación científica y técnica.

Por último, agradecer a Dña. María José Marrón Taranco el interés y esmero puestos en la mecanografía del original.

# INDICE

	pag
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCION	4
2.1. Generalidades	4
2.2. Termodinamica de la adsorción física de mezclas gaseosas	5
2.2.1. Tratamiento quimico: presión superficial, ley de Raoult modificada	5
2.2.2. Cálculo de las presiones superficiales $\Pi$ de los componentes puros y de las mezclas, de las presiones $P_i^0(\Pi)$ de los distintos componentes de las mismas y de sus coeficientes de actividad $\gamma_i$ a partir de los datos experimentales	12
2.3. Predicción del equilibrio de adsorción	15
2.3.1. Soluciones aproximadas	15
2.3.2. Soluciones basadas en la analogía con el equilibrio L-V	17
2.4. Objeto y alcance de la presente investigación	21
3. INSTALACION EXPERIMENTAL	24
3.1. Caracteristicas generales	24
4. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO	29
4.1. Adsorbente	29
4.2. Mezclas gaseosas	29

	pag
4.3. Procedimiento operativo	30
4.3.1. Experimentos de lecho fluidizado	31
5. RESULTADOS	34
5.1. Isotermas de adsorción	34
5.1.1. Componentes puros	34
5.1.2. Mezclas binarias	39
5.1.3. Mezclas ternarias	72
6. DISCUSION DE RESULTADOS	91
6.1. Isotermas de adsorción de compuestos puros	91
6.1.1. Influencia de las variables: presión, temperatura y cantidad de diluyente	91
6.1.2. Cálculo de la presión superficial de los compuestos puros	92
6.2. Isotermas de adsorción de mezclas binarias	103
6.2.1. Influencia de las variables: presión y temperatura	103
6.2.2. Cálculo de la presión superficial de las mezclas y de las $P_1^0(\pi)$ y $P_2^0(\pi)$	103
6.3. Isotermas de adsorción de mezclas ternarias	108
6.3.1. Influencia de las variables: presión y temperatura	108
6.3.2. Predicción teórica de las composiciones de equilibrio	108
7. CONCLUSIONES	146
8. RECOMENDACIONES	149

	pag
9. APENDICE	150
9.1. Detalle de los materiales emplea <u>dos</u>	150
9.1.1. Pureza de los compuestos utilizados	150
9.1.2. Características de las par <u>tículas</u> del adsorbente	150
9.2. Detalles del procedimiento	154
9.2.1. Cálculo del volumen del ad <u>sorbente</u>	154
9.2.2. Cálculo del volumen de la instalación	154
9.2.3. Análisis cromatográfico: condiciones generales	156
9.2.4. Cálculo de un experimento	158
9.2.5. Cálculo de la presión su <u>perficial</u>	173
BIBLIOGRAFIA	188

## 1. RESUMEN

La investigación objeto de esta tesis doctoral constituye parte de un programa que sobre fenómenos de adsorción se viene desarrollando, desde hace algunos años en el Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Químicas de la Universidad Complutense de Madrid.

En esta memoria se informa de los resultados alcanzados al investigar el equilibrio de adsorción de mezclas gaseosas multicomponentes de hidrocarburos ligeros, como son metano, etileno, etano y propileno, utilizando como adsorbente el carbón activo.

El interés suscitado por los fenómenos de adsorción - en los últimos años radica tanto en el encarecimiento de las materias primas y la exigencia de elevados grados de pureza de las mismas, como en la necesidad impuesta por la legislación - vigente sobre contaminación de las corrientes líquidas y gaseosas de evacuación. Estos hechos determinan que esta operación de separación sea hoy en día competitiva con las de rectificación y absorción, en muchos casos. Debido a ello y a la ausencia prácticamente total de datos de equilibrio en sistemas multicomponentes gas-sólido imprescindibles para el diseño de los lechos de adsorción, se consideró interesante proseguir la investigación iniciada en este Departamento con sistemas de un solo adsorbato y ampliarla a aquellos que implican dos, tres o más adsorbatos.

El programa de investigación planteado consistió fundamentalmente en las siguientes etapas:

- Selección de las mezclas a investigar: entre las formadas

por hidrocarburos ligeros asequibles y a ser posible de interés industrial.

- Puesta a punto de una tecnica experimental precisa para la obtención de los datos de equilibrio.

- Determinación experimental de las composiciones de equilibrio: isothermas de adsorción de los componentes puros y de sus mezclas binarias y ternarias a distintas condiciones de presión y temperatura.

- Determinación teorica de las composiciones de equilibrio en mezclas binarias: cálculo de los coeficientes de actividad de los datos experimentales y determinación de las constantes que a cada mezcla corresponden en las ecuaciones de Wilson y UNIQUAC.

- Predicción teorica de las composiciones de equilibrio en el caso de mezclas ternarias: cálculo de los coeficientes de actividad de los componentes adsorbidos a partir de las ecuaciones de Wilson y UNIQUAC utilizando las constantes encontradas para cada una de las tres mezclas binarias comprendidas en las mezclas ternarias que se consideren.

Se eligio la mezcla de metano-etileno-etano, dada la importancia en la industria petroquimica a fin de obtener etileno de elevado grado de pureza a partir de la misma. Posteriormente se añadió un cuarto adsorbato (propileno) a fin de posibilitar el estudio de otras mezclas binarias y ternarias.

La instalación experimental consta de un circuito cerrado dotado de un compresor que proporciona un flujo continuo a través del adsorbente que constituye un lecho fluido y un cromatografo de gases conectado en paralelo al mismo que permite analizar en cada instante la composición de la mezcla gaseosa.

Se determinaron la isothermas de adsorción de los componentes puros metano, etileno, etano y propileno, asi como de las mezclas binarias, metano-etileno, metano-etano, etileno-etano - etileno-propileno y etano-propileno y de las mezclas ternarias metano-etileno-etano y etileno-etano-propileno, todas a tempera-



turas de 20°C y 50°C y presiones comprendidas entre 0 y 760mm. de Hg.

Presuponiendo la semejanza entre el equilibrio vapor-liquido y gas-fase adsorbida se determinaron teoricamente las composiciones de equilibrio en el caso de mezclas binarias. Para ello a partir de los datos experimentales y mediante la ecuación de Dalton y Raoult modificada por introducción en la misma del concepto de presión superficial se calcularon los coeficientes de actividad con los que pudieron determinarse las consta ntes para cada mezcla binaria en las ecuaciones teoricas de Wilson y UNIQUAC para el equilibrio líquido-vapor. A partir de estas últimas se reprodujeron con toda fidelidad los datos experimentales correspondientes a las cinco mezclas binarias investigadas.

Finalmente mediante las ecuaciones últimamente indica-das y las dos constantes de cada mezcla binaria a que se acaba de aludir pudieron calcularse los coeficientes de actividad de los tres componentes adsorbidos en cada una de las mezclas ternarias investigadas y con ellos y la también citada ecuación - de Dalton y Raoult modificada predecir asi mismo con toda fidelidad los datos experimentales.

## 2. INTRODUCCION

### 2.1. GENERALIDADES

El número e importancia de las aplicaciones y procesos industriales que implican fenómenos de adsorción física - justifican el interés por el estudio de los mismos.

En los últimos años, el encarecimiento de las materias primas y la creciente exigencia de determinados grados de pureza de las mismas, así como las legislaciones cada vez más rigurosas sobre la contaminación de las corrientes líquida y gaseosa de evacuación, han determinado un gran auge de la adsorción como operación de separación competitiva en muchos casos con las de rectificación, absorción y extracción, (1-7). Así, la adsorción además de su ya clásica aplicación a la purificación de gases industriales, cobra cada día más importancia para la consecución de vacíos elevados, en la recuperación de productos de fisión, etc. (8-27).

No obstante, la ausencia de datos básicos de equilibrio y sobre coeficientes de difusión motiva que el diseño de los lechos industriales de adsorción siga siendo muy empírico, basado en la experimentación directa en laboratorio con lechos similares de las máximas dimensiones posibles y en la influencia de variables tales como tamaño, dureza, resistencia, posibilidad de buena distribución, pérdida de carga y coste del adsorbente, que realmente no afectan al fenómeno físico de la adsorción, aunque son importantes desde un punto de vista mecánico global.

En investigaciones previas de nuestro Departamento se puso a punto una técnica experimental original para la determi

nación de coeficientes de difusión de componentes puros en el interior de los sólidos adsorbentes gaseosos (28), se desarrolló un modelo para la predicción de curvas de rotura en los lechos adsorbentes fijos (29) y se inició el estudio del fenómeno inverso de desorción (30). En esta memoria se da cuenta del estudio del equilibrio de adsorción, en el caso de mezclas multicomponentes, siguiendo con el amplio programa de trabajo emprendido con vista a contribuir a aportar la máxima información sobre datos básicos, de equilibrio y cinéticos para corregir el casi total empirismo con que se conciben, calculan y diseñan las operaciones de separación basadas en la adsorción física.

## 2.2. TERMODINAMICA DE LA ADSORCION FISICA DE MEZCLAS GASEOSAS

### 2.2.1. Tratamiento químico: Presión superficial, ley de Raoult modificada

Los sistemas líquido-vapor y adsorbato-gas ofrecen una evidente analogía en la que puede basarse el tratamiento termodinámico del equilibrio de adsorción gaseosa.

Hill (31), Myers y Prausnitz (32) y Van Ness (33) se han ocupado recientemente del mismo. Empiezan por definir claramente las dos fases constitutivas del sistema. Durante el fenómeno de la adsorción, las propiedades de las fases fluida y sólida cambian en las inmediaciones de su superficie límite, pero no lo hacen bruscamente, concretamente los gradientes de propiedades en el fluido son grandes, pero no infinitos en las inmediaciones de la superficie sólida y en cuanto a esta última fase las anomalías en las proximidades de su superficie, aunque muy inferiores, indudablemente también se manifiestan.

Resultando imposible establecer con suficiente precisión la región interfacial, entendiéndose por tal las porciones de ambas fases cuyas propiedades se alteran por la contigüedad

de la otra, de acuerdo con la idea original de J.W. Gibbs, se supondrá dicha región equivalente, a todos los efectos, a una nueva fase bidimensional asentada sobre una superficie matemática imaginaria con propiedades termodinámicas características.

Aunque tal fase bidimensional está en equilibrio térmico y mecánico con las fases gas y sólido que separa, se supondrá que solo está en equilibrio termodinámico con la fase gaseosa y que la fase sólida adsorbente es *termodinámicamente inerte* o lo que es igual que sus propiedades permanecen - prácticamente invariables en contraste con la gran variación de las mismas en la fase gaseosa.

Por último, también se supone que el área del adsorbente A es una variable independiente de la temperatura, de la presión, de la composición y de la cantidad de adsorbato.

Consideremos el sistema cerrado constituido por los dos subsistemas abiertos G(fase gaseosa tridimensional) y A(fase adsorbato bidimensional). La variación de entalpía libre de Gibbs del primero tendrá por expresión:

$$\begin{aligned} dG^G &= \left(\frac{\partial G^G}{\partial T}\right)_{P, N_i^G} dT + \left(\frac{\partial G^G}{\partial P}\right)_{T, N_i^G} dP + \sum_{i=1}^C \left(\frac{\partial G^G}{\partial N_i^G}\right)_{T, P, N_{j \neq i}^G} dN_i^G = \\ &= -S^G dT + V^G dP + \sum_{i=1}^C \mu_i^G dN_i^G \quad [2-1] \end{aligned}$$

Con sus tres términos constituidos por productos de un factor intensivo por un factor extensivo. Los factores intensivos de los mismos son:

$dT$

$dP$

$$\mu_i^G = \left(\frac{\partial G^G}{\partial N_i^G}\right)_{T, P, N_{j \neq i}^G} = \bar{G}_i^G \text{ potencial químico o entalpía libre}$$

molar parcial, respectivamente; sus factores extensivos son:

$$-S = \left( \frac{\partial G^G}{\partial T} \right)_{P_i, N_i^G}$$

$$V = \left( \frac{\partial G^G}{\partial P} \right)_{T, N_i^G}$$

$$dN_i^G$$

De modo paralelo, la variación de entalpía libre de Gibbs de la fase adsorbato A, de acuerdo con diversos autores ( ) podrá expresarse así:

$$\begin{aligned} dG^A &= \left( \frac{\partial G^A}{\partial T} \right)_{\Pi, N_i^A} dT + \left( \frac{\partial G^A}{\partial \Pi} \right)_{T, N_i^A} d\Pi + \sum_{i=1}^C \left( \frac{\partial G^A}{\partial N_i^A} \right)_{T, \Pi, N_{j \neq i}^A} dN_i^A = \\ &= -S^A dT + V^A dP + \sum_{i=1}^C \mu_i^A dN_i^A \end{aligned} \quad [2-2]$$

también con sus tres términos producto de un factor intensivo por otro extensivo, siendo los primeros:

$$dT$$

$d\Pi$ : variación diferencial de la llamada *presión superficial* en la fase adsorbato bidimensional, equivalente a la presión P de la fase gaseosa tridimensional.

$$\mu_i^A = \left( \frac{\partial G^A}{\partial N_i^A} \right)_{T, \Pi, N_{j \neq i}^A} = \overline{G}_i^A \text{ potencial químico o entalpía libre}$$

molar parcial en la fase adsorbato.

Los factores extensivos son:

$$-S = \left( \frac{\partial G^A}{\partial T} \right)_{P, N_i^A}$$

$A = \left( \frac{\partial G^A}{\partial \Pi} \right)_{T, N_i^A}$  : area total de la fase adsorbato bidimensional equivalente al volumen  $V$  de la fase gaseosa tridimensional.

$$dN_i^A$$

Las condiciones de equilibrio del sistema cerrado - G-A serán:

$$T^G = T^A = \text{cte}$$

$$\Pi = \text{cte}$$

[2-3]

$$P = \text{cte}$$

$$\mu_i^G = \mu_i^A$$

Teniendo en cuenta el significado de las magnitudes molares - parciales, es decir, el del potencial químico  $\mu_i = \bar{G}_i$ , de modo general de la entalía libre de Gibbs de cualquiera de las fases será:

$$G = \sum_{i=1}^C \bar{G}_i N_i = \sum_{i=1}^C \mu_i N_i \quad [2-4]$$

o bien su variación diferencial

$$dG = \sum_{i=1}^C \mu_i dN_i + \sum_{i=1}^C N_i d\mu_i \quad [2-5]$$

Aplicando la ecuación [2-5] a la fase adsorbato e -  
igualando la expresión  $dG^A$  que resulta a la [2-2] se tiene:

$$S^A dT - A d\pi + \sum_{i=1}^C N_i^A d\mu_i^A = 0 \quad [2-6]$$

Si por otra parte se supone comportamiento ideal para la fase gaseosa, circunstancia aceptable si la presión de la misma no supera a  $P=1$  atm, según la termodinámica clásica, se tendrá:

$$d\mu_i^G = RT \ln (Py_i) \quad [2-7]$$

Evidentemente de las relaciones [2-3] , [2-6] y [2-7] se deduce:

$$-\frac{A}{RT} d\Pi + N_t d\ln P + \sum_{i=1}^c N_i d\ln y_i = 0 \quad T = \text{cte} \quad [2-8]$$

Finalmente, si durante un experimento se mantiene constante la composición de la fase gaseosa, variando su presión desde cero a  $P$ , lo que paralelamente supondría una variación de la presión superficial sobre la superficie constante,  $A$  del adsorbente desde cero a  $\Pi$ , la integración de la ecuación [2-8] cuyo tercer término se anularía entre tales límites conduce a:

$$\frac{\Pi A}{RT} = \int_0^P \frac{N_t}{P} dP, \quad T, y_i = \text{cte} \quad [2-9]$$

ecuación que, por integración gráfica, permite la evaluación de la presión superficial ejercida por los componentes puros, a partir de los datos de equilibrio experimentales,  $N_t$  frente a  $P$ , y a partir de los mismos, como se expresa más adelante, dicha presión para la mezclas de varios componentes.

La entalpía libre molar de Gibbs de la fase adsorbato  $A$ , teniendo en cuenta el significado del coeficiente de actividad y según la termodinámica clásica podrá expresarse así:

$$\begin{aligned} \frac{G^A}{N_t^A} = g^A &= \sum_{i=1}^c x_i g_i^{0A} + \Delta g_{\text{mezcla}}^A = \sum_{i=1}^c x_i g_i^{0A} + \\ &+ RT \sum_{i=1}^c x_i \ln \gamma_i x_i \end{aligned} \quad [2-10]$$

representando por  $x_i$  las fracciones molares de los componentes en la fase adsorbato, por  $g_i^{0A}$  sus entalpías libres molares en estado puro y adsorbido, por  $\Delta g_{\text{mezcla}}^A$  la variación de entalpía libre de su mezcla y por  $\gamma_i$  los coeficientes de actividad de los distintos componentes en la fase adsorbato que se consideran.



Igualando las dos expresiones de la entalpía libre total de Gibbs que se deducen de las dos ecuaciones [2-4] y [2-10] se tiene:

$$G^A = \sum_{i=1}^C \mu_i^A N_i^A = \sum_{i=1}^C N_i^A g_i^{0A} + RT \sum_{i=1}^C N_i^A \ln \gamma_i x_i \quad \therefore$$

$$\therefore \mu_i^A = g_i^{0A} + RT \ln \gamma_i x_i \quad [2-11]$$

Como quiera que en un sistema cerrado, constituido exclusivamente por un componente gaseoso puro y el adsorbente, - según la ley de las fases, en el equilibrio solo existen dos grados de libertad, se comprende que fijados en el mismo la temperatura  $T$  y la presión superficial  $\Pi$ , la presión de dicho componente en la fase gaseosa  $P_i^0$  quedará determinada, es decir en el equilibrio, a cada temperatura,  $P_i^0$  será función de  $\Pi$ . Por consiguiente si se escogen estados de referencia consistentes en los componentes puros gaseosos a 1 atm. de presión, cumpliendo la ley de gases perfectos, tanto las entalpías libres molares  $g_i^{0A}$  de la ecuación [2-11] como los potenciales químicos de los componentes en la fase gaseosa, de acuerdo con la ecuación [2-7], podrán expresarse así:

$$g_i^{0A}(T, \Pi) = g_i^0(T) + RT \ln P_i^0(\Pi) \quad [2-12]$$

$$\mu_i^G(T, P, y_i) = g_i^0(T) + RT \ln(P y_i) \quad [2-13]$$

representando  $g_i^0(T)$ , la entalpía libre molar de Gibbs de cada componente en el estado de referencia establecido.

Sustituyendo el valor de  $g_i^{0A}$  que expresa la ecuación [2-12], en la ecuación [2-11] e igualando el valor de  $\mu_i^A$  resul-

tante al de  $\mu_i^G$ , ecuación [2-13], de acuerdo con las condiciones de equilibrio [2-3] se tiene:

$$Py_i = \gamma_i P_i^0(\Pi) x_i \quad [2-14]$$

Expresión de las leyes de Dalton y Raoult modificadas aplicadas al sistema cerrado en equilibrio gas-adsorbato, totalmente similar a la establecida para los sistemas vapor-líquido. Evidentemente la presión de vapor del componente puro a la temperatura de la mezcla para este último sistema, ha sido sustituida por la presión que debería tener un componente puro, para al adsorberse ejercer la misma presión superficial  $\Pi$ , que ejercería la mezcla gaseosa real a la temperatura de que se trate. Así mismo el coeficiente de actividad  $\gamma_i$  se referirá a la corrección de la no idealidad de la mezcla adsorbida, es decir, de la fase adsorbato.

2.2.2. Cálculo de las presiones superficiales  $\Pi$  de los componentes puros y de las mezclas, de las presiones  $P_i^0(\Pi)$  de los distintos componentes de las mismas y de sus coeficientes de actividad  $\gamma_i$  a partir de los datos experimentales.

i) *componentes puros.*

A partir de las isothermas de adsorción de los componentes puros  $N_t$  frente a  $P$ , se puede resolver graficamente la integral del segundo miembro de la ecuación [2-9] y llegar al valor de su primer miembro  $\Pi A/RT$ . Ahora bien como al representar  $N_t/P$  frente a  $P$ , para llevar a cabo dicha integración resultaban curvas practicamente asintóticas al eje de ordenadas para el valor  $P=0$  del limite inferior de integración, se prefirió sustituir dicha integral por su equivalente:

$$\int_0^P \frac{N_t}{P} dp = \int_0^{N_t} \frac{dP/P}{dN_t/N_t} dN_t = \int_0^{N_t} \frac{d \ln P}{d \ln N_t} dN_t \quad [2-15]$$

con lo que al representar  $d \ln P / d \ln N_t$  frente a  $N_t$ , para la integración gráfica, se salva dicho inconveniente.

Operando de esta forma para distintos valores del límite superior de integración, para cada componente puro se podrá llegar a la curva  $\Pi A/RT$  frente a  $P$ .

## ii) Mezclas.

Para una mezcla gaseosa determinada, partiendo de un haz de isothermas,  $N_t$  frente a  $P$ , todas a la misma temperatura  $T$  y cada una para composiciones iniciales distintas, para cada presión  $P$  se dispondrá de tantas series de valores ( $N_t, x_1, x_2, \dots, x_c, y_1, y_2, \dots, y_c$ ) como isothermas.

La ecuación [2-8] aplicada a dicha serie de valores - conduce a la expresión:

$$- \frac{A}{RT} d\Pi + N_t (x_1 d \ln y_1 + x_2 d \ln y_2 + \dots + x_c d \ln y_c) = 0$$

$$\frac{A}{RT} d\Pi = N_t \left( x_1 \frac{dy_1}{y_1} + x_2 \frac{dy_2}{y_2} + \dots + x_c \frac{dy_c}{y_c} \right) \quad [2-16]$$

Integrando esta ecuación entre los límites ( $\Pi_{y_1=1, y_2=0, y_c=0}$ ,  $y_1=1, y_2=0 \dots y_c=0$ ) y los correspondientes a cualquier serie de valores conocidos de los antes indicados, ( $\Pi_{y_1, y_2, y_c}, y_1, y_2, \dots, y_c$ ).

$$\frac{A}{RT} \int_{\Pi_{y_1=1, y_2=0, \dots, y_c=0}}^{\Pi_{y_1, y_2, \dots, y_c}} d\Pi = \frac{A \Delta \Pi (1-y_1), (0-y_2), \dots, (0-y_c)}{RT} =$$

$$= \int_1^{y_1} \frac{N_t x_1}{y_1} dy_1 + \int_0^{y_2} \frac{N_t x_2}{y_2} dy_2 + \dots + \int_0^{y_c} \frac{N_t x_c}{y_c} dy_c \quad [2-17]$$

Con todas las integrales de su segundo miembro calculables graficamente a partir de las series de valores experimentales indicadas. Sumando el término:

$$\frac{A\Delta\Pi(1-y_1), (0-y_2), \dots, (0-y_c)}{RT} \text{ al valor } \frac{A\Pi_{y_1=1, y_2=0, \dots, y_c=0}}{RT}$$

correspondiente al componente i puro a la misma presión P, se tendrá el valor de la presión superficial  $\Pi_{y_1, y_2, \dots, y_c}$  correspondiente a la serie de valores  $(N_t, x_1, x_2, \dots, x_c, y_1, y_2, \dots, y_c)$ , escogida como límite superior de la integración:

$$\begin{aligned} \frac{A\Pi_{y_1, y_2, \dots, y_c}}{RT} &= \frac{A\Pi_{y_1=1, y_2=0, \dots, y_c=0}}{RT} + \\ &+ \frac{A\Delta\Pi(1-y_1), (0-y_2), \dots, (0-y_c)}{RT} \end{aligned} \quad [2-18]$$

Bastará localizar, en las curvas  $\Pi A/RT$  frente a P correspondientes a los c componentes puros, las ordenadas:

$$\frac{A\Pi_{y_1, y_2, \dots, y_c}}{RT}$$

para encontrar las correspondientes abscisas  $P_i^0(\Pi)$ , que sustituidas en las ecuaciones de Raoult modificadas [2-14], junto con los restantes valores  $(N_t, x_1, x_2, \dots, x_c, y_1, y_2, \dots, y_c, P)$  de la serie escogida, conducirán a los coeficientes de actividad  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_c$  que corresponden a la misma.

Concretamente en el caso de una mezcla binaria la ecuación [2-16] se simplifica a:

$$\frac{A}{RT}d\Pi = N_t \left( \frac{x_1}{y_1}dy_1 + \frac{x_2}{y_2}dy_2 \right) = N_t \frac{x_1 - y_1}{y_1(1 - y_1)}dy_1 \quad [2-19]$$

con lo que la ecuación [2-17] se reduce a:

$$\frac{A}{RT} \int_{\Pi_{y_1=1}}^{\Pi_{y_1=0}} d\Pi = \frac{A\Delta\Pi(1-y_1)(0-y_2)}{RT} = \int_1^{y_1} N_t \frac{x_1 - y_1}{y_1(1 - y_1)}dy_1 \quad [2-20]$$

resuelta la integral del segundo miembro graficamente, mediante las series de valores  $(N_t, x_1, x_2, y_1, y_2)$  a T y P constantes, la presión superficial  $\Pi_{y_1, y_2}$  correspondiente a la serie  $(N_t, y_1, y_2)$  escogida como límite superior en la integración será:

$$\frac{A\Pi_{y_1, y_2}}{RT} = \frac{A\Pi_{y_1=1, y_2=0}}{RT} + \frac{A\Delta\Pi(1-y_1), (0-y_2)}{RT} \quad [2-21]$$

pudiéndose ya localizar en las abcisas de los puntos de las curvas  $\Pi A/RT$  frente a P de los componentes puros, que tienen como ordenada el valor

$\frac{A\Pi_{y_1, y_2}}{RT}$ , los valores  $P_1^0(\Pi)$  y  $P_2^0(\Pi)$ , que sustituidos en las dos ecuaciones de Raoult modificadas [2-14] junto a los valores  $(P, x_1, y_1, x_2, y_2)$  de la serie escogida, conducirán a los valores de los coeficientes de actividad  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  para la misma.

## 2.3. PREDICCIÓN DEL EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN

### 2.3.1. Soluciones aproximadas

Se han propuesto muchos métodos para predecir el equilibrio de adsorción de mezclas. Young y Crowell (34), exponen los métodos utilizados hasta 1.962, casi todos ellos basados en extensiones de las ecuaciones de Langmuir y B.E.T. para lechos fijos de adsorción.

Posteriormente, Myers (35), desarrolló un modelo para la predicción del equilibrio de adsorción de mezclas binarias, a partir de las isothermas de los componentes puros, suponiendo comportamiento ideal de la solución adsorbida, es decir, con valores unidad de los coeficientes de actividad, cualquiera que sea su composición  $x_i$ , con ello la ecuación [2-14] se simplificaría a la de Raoult:

$$P y_i = P_i^0 (\Pi) x_i \quad T = \text{cte.} \quad [2-22]$$

Así, para la mezcla binaria la presión de equilibrio puede ser expresada en función de la composición de la fase adsorbida  $x_i$  y las presiones de equilibrio, para la presión superficial  $\Pi$  de los componentes puros.

$$P = x_1 P_1^0 (\Pi) + (1-x_1) P_2^0 (\Pi) \quad [2-23]$$

Dicho autor, propuso también un método gráfico para el cálculo del equilibrio binario, basado en las isothermas de los componentes puros. Los datos obtenidos los comparó con los experimentales de Szepeszy e Illes (36), poniéndose de manifiesto que esta teoría no reproduce fielmente los datos experimentales, aunque si da una buena aproximación para los sistemas estudiados.

Más recientemente, Friederich y Mullins (37), pudieron reproducir el equilibrio de adsorción de algunas mezclas binarias, mediante una ecuación de estado Van der Waals para la fase adsorbida bidimensional de la forma:

$$\Pi = \frac{KT}{\sigma - \beta} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \quad [2-24]$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes de la ecuación de Van der Waals bidimensional,  $K$  es la constante de la ley de Henry y  $\sigma$  el área molecular del adsorbato. Dicha ecuación [2-24] corresponde a una ecuación de las isothermas de adsorción del tipo:

$$\ln P - \ln \frac{\theta}{1-\theta} - \frac{\theta}{1-\theta} = \ln K - \frac{2\alpha\theta}{KT\beta} \quad [2-25]$$

donde  $\theta$ , es la fracción de adsorbente cubierta, encontrándose una excelente concordancia entre los valores obtenidos y los deducidos a partir del modelo de Myers de solución adsorbida ideal.

### 2.3.2. Soluciones basadas en la analogía con el equilibrio L-V

Aquí, se considera que la fase adsorbida no se comporta idealmente por lo que en la ecuación de equilibrio [2-14], el coeficiente de actividad tiene valores diferentes de la unidad, debido a los fenómenos de desplazamiento de los adsorbatos en la superficie del adsorbente, por la notable diferencia de capacidad de adsorción de los mismos. Por consiguiente, no bastan las isothermas de los componentes puros para predecir el equilibrio de adsorción de mezclas binarias, sino que se requieren datos experimentales sobre las mismas, con objeto de poder calcular los coeficientes de actividad e intentar con ellos la predicción del equilibrio de adsorción en el caso de mezclas multicomponentes.

El método, basado en la analogía entre termodinámica de soluciones reales y termodinámica de mezclas adsorbidas, considera a la fase adsorbida como una mezcla real más, es decir, con entropía molar de exceso y entalpía molar de exceso distintas de cero ( $S^E \neq 0$ ,  $h^E \neq 0$ ) y por tanto, en principio, parece pueden resultar aplicables las ecuaciones deducidas para su estudio en el equilibrio vapor-líquido, como son las ecuaciones de Wilson y UNIQUAC, fundamentalmente.

#### i) Ecuación de WILSON

Wilson (38), establece que las mezclas líquidas son heterogeneas microscópicamente consideradas, no teniendo por que coincidir las composiciones locales de dos puntos cualesquiera de las mismas, de esta forma, establece que las moléculas que integran las mezclas líquidas no difieren solo en su volumen efectivo como hicieron Flory (39) y Huggins (40), sino también en sus fuerzas intermoleculares determinantes de

las composiciones locales, de tal modo, que la entalpía libre de Gibbs de exceso toma la forma:

$$G^E = - RT \sum_i x_i \ln(1 - \sum_j x_j \Lambda_{ji}) \quad [2-26]$$

Dos claras ventajas presenta la ecuación anterior en la aplicación a mezclas multicomponentes, por un lado los parámetros  $\Lambda_{ij}$  son estimables a partir de los datos experimentales de sus correspondientes mezclas binarias y dichos parámetros son constantes en intervalos moderados de temperatura, por lo que pueden utilizarse los determinados a una para otras que no difieran excesivamente de ella.

La ecuación [2-26] para una mezcla binaria se simplifica a:

$$\frac{G^E}{RT} = -x_1 \ln(1 - \Lambda_{21} x_2) - x_2 \ln(1 - \Lambda_{12} x_1) \quad [2-27]$$

Los parámetros  $\Lambda_{12}$  y  $\Lambda_{21}$  de la ecuación [2-27] son positivos si la desviación de la idealidad es positiva, ( $G^E > 0$ ) y son negativos cuando dicha desviación también lo es ( $G^E < 0$ ).

De la definición de entalpía libre molar de exceso y la ecuación [2-26] es posible determinar los coeficientes de actividad  $\gamma_i$ , resultando la expresión:

$$\ln \gamma_i = -\ln(1 - \sum_j x_j \Lambda_{ji}) + 1 - \sum_j \frac{x_j (1 - \Lambda_{ij})}{(1 - \sum_k x_k \Lambda_{kj})} \quad [2-28]$$

Para una mezcla binaria la ecuación [2-28] toma la forma:

$$\ln \gamma_1 = -\ln(1 - \Lambda_{21} x_2) + x_2 \left( \frac{x_2 \Lambda_{12}}{1 - \Lambda_{12} x_1} - \frac{x_1 \Lambda_{21}}{1 - \Lambda_{21} x_2} \right) \quad [2-29]$$

y paralelamente para el segundo componente:

$$\ln \gamma_2 = -\ln(1 - \Lambda_{12} x_1) - x_1 \left( \frac{x_2 \Lambda_{12}}{1 - \Lambda_{12} x_1} - \frac{x_1 \Lambda_{21}}{1 - \Lambda_{21} x_2} \right) \quad [2-30]$$



Sistema de ecuaciones, el formado por [2-29] y [2-30], que habrá que resolver por tanteos para llegar a los valores de las ctes.  $\Lambda_{12}$ ,  $\Lambda_{21}$ , a partir de los correspondientes puntos de equilibrio y coeficientes de actividad experimentales.

Así mismo, sería posible obtener los valores de los parámetros  $\Lambda_{12}$ ,  $\Lambda_{21}$ , a partir de las citadas ecuaciones, expresadas en función de los coeficientes de actividad a dilución infinita.

$$x_1 \ll x_2, x_1 \longrightarrow 0, x_2 \longrightarrow 1 \text{ ec. [2-29]: } \ln \gamma_1^\infty = -\ln(1-\Lambda_{21}) + \Lambda_{12} \quad [2-31]$$

$$x_2 \ll x_1, x_2 \longrightarrow 0, x_1 \longrightarrow 1 \text{ ec. [2-30]: } \ln \gamma_2^\infty = -\ln(1-\Lambda_{12}) + \Lambda_{21} \quad [2-32]$$

## ii) Ecuación de UNIQUAC

Según Hildebrand y Scott (41), en las mezclas de  $n$  electrolitos, puede sustituirse la entalpía libre de Gibbs ( $T$  y  $P$ , ctes.), por la energía libre de Helmoth ( $T$  y  $V$ , ctes.), con esta idea, más el concepto de composición local de la ecuación de Wilson (38), y el modelo de Guggenheim (42) de equilibrio, Abrams y Prausnitz (43) proponen la ecuación UNIQUAC, de tal modo que generalizan las ecuaciones propuestas para expresar la entalpía libre de exceso, llegando a la siguiente expresión para deducir el valor del coeficiente de actividad de cada uno de los componentes de una mezcla:

$$\ln \gamma_i = \ln \frac{\phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} s_i \ln \frac{\theta_i}{\phi_i} + l_i - \frac{\phi_i}{x_i} \sum_j x_j l_j + s_i \left[ 1 - \ln \left( \sum_j \theta_j \tau_{ji} \right) - \sum_j \frac{\theta_j \tau_{ij}}{\sum_k \theta_k \tau_{kj}} \right] \quad [2-33]$$

$$\text{siendo } l_j = \frac{z}{2} (r_j - s_j) - (r_j - 1) \quad [2-34]$$

y viniendo expresadas las variables  $\theta_i$  y  $\phi_i$  por:

$$\theta_i = \frac{s_i x_i}{\sum_j s_j x_j} \quad [2-35]$$

$$\phi_i = \frac{r_i x_i}{\sum_j r_j x_j} \quad [2-36]$$

Las variables representadas por las ecuaciones [2-35] y [2-36], son respectivamente la fracción de superficies medias  $\theta_i$ , y la fracción de segmentos medios  $\phi_i$ , referidas a la composición de la mezcla, e implicando el conocimiento de los parámetros estructurales de las moléculas individuales  $s_i$  y  $r_i$ , - proporcionales a la superficie molecular y el tamaño de la molécula respectivamente, ambos evaluables a partir de la bibliografía (44).

Finalmente, en la ecuación [2-33] aparece el índice de coordinación  $z$ , al que consistentemente se le atribuye un valor medio razonable de 10.

Los parámetros  $\tau_{ij}$  y  $\tau_{ji}$ , son evaluables, igual que ocurriría con los  $\Lambda_{ij}$  y  $\Lambda_{ji}$  de la ecuación de Wilson, a partir de los datos experimentales de cada mezcla binaria. Como sucedía con la expresión anterior, la ecuación UNIQUAC, solo implica constantes empíricas binarias en la predicción del equilibrio para sistemas multicomponentes.

La ecuación [2-33], aplicada a una mezcla binaria conduce a la expresión:

$$\begin{aligned} \ln \gamma_1 = & \ln \frac{\phi_1}{x_1} + \frac{z}{2} s_1 \ln \frac{\theta_1}{\phi_1} + \phi_2 \left( 1 - \frac{r_1}{r_2} l_2 \right) - s_1 \ln(\theta_1 + \theta_2 \tau_{21}) + \\ & + \theta_2 s_1 \left( \frac{\tau_{21}}{\theta_1 + \theta_2 \tau_{21}} - \frac{\tau_{12}}{\theta_2 + \theta_1 \tau_{12}} \right) \end{aligned} \quad [2-37]$$

y paralelamente para el segundo componente:

$$\begin{aligned} \ln \gamma_2 = & \ln \frac{\phi_2}{x_2} + \frac{z}{2} s_2 \ln \frac{\theta_2}{\phi_2} + \phi_1 \left( 1 - \frac{r_2}{r_1} l_1 \right) - s_2 \ln(\theta_2 + \theta_1 \tau_{12}) + \\ & + \theta_1 s_2 \left( \frac{\tau_{12}}{\theta_2 + \theta_1 \tau_{12}} - \frac{\tau_{21}}{\theta_1 + \theta_2 \tau_{21}} \right) \end{aligned} \quad [2-38]$$

Estas ecuaciones, para mezclas infinitamente diluidas respecto a cada uno de los componentes, toman la forma:

$$x_1 \ll x_2, x_1 \longrightarrow 0, x_2 \longrightarrow 1 \text{ ec. [2-37] : } \ln \gamma_1^\infty = \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{z}{2} s_1 \ln \left( \frac{s_1}{s_2} \frac{r_2}{r_1} \right) + L_1 - \frac{r_1}{r_2} L_2 - s_1 \ln \tau_{21} + s_1 (1 - \tau_{12}) \quad [2-39]$$

y

$$x_2 \ll x_1, x_2 \longrightarrow 0, x_1 \longrightarrow 1 \text{ ec. [2-38] : } \ln \gamma_2^\infty = \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{z}{2} s_2 \ln \left( \frac{s_2}{s_1} \frac{r_1}{r_2} \right) + L_2 - \frac{r_2}{r_1} L_1 - s_2 \ln \tau_{12} + s_2 (1 - \tau_{21}) \quad [2-40]$$

Sistema de ecuaciones, que además de los parámetros estructurales de los componentes puros, solo contiene dos incógnitas,  $\tau_{12}$  y  $\tau_{21}$ , que podrán evaluarse resolviendo los mismos por tanteo, bien, conocidos los coeficientes de actividad experimentales, ecuaciones [2-37] y [2-38], o los coeficientes de actividad a dilución infinita, ecuaciones [2-39] y [2-40].

#### 2.4. OBJETO Y ALCANCE DE LA PRESENTE INVESTIGACION

Se ha puesto de manifiesto la importancia de la adsorción como operación de separación, así como la necesidad de disponer de datos de equilibrio fidedignos de las distintas mezclas a separar sobre los adsorbentes convenientes, para poder diseñar los correspondientes lechos de adsorción.

Por otro lado, la presencia de hidrocarburos ligeros ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ), en los gases de craqueo en la industria petroquímica, dificultan y encarecen la separación y purificación de olefinas.

Eligiendo por ello estos hidrocarburos, se pensó resultaría interesante, tanto la puesta a punto de una técnica experimental precisa, para llegar a los datos de equilibrio indispensables en cada operación de adsorción, como un estu-

dio teórico de los datos, para intentar por un tratamiento - análogo al seguido en el equilibrio líquido-vapor, establecer las bases para la posible predicción de tales datos de equilibrio, sin necesidad de experimentación directa, a partir de - un mínimo número de datos.

En consecuencia, se proponía la obtención de las isothermas de adsorción de los componentes puros, así como de sus posibles mezclas binarias y ternarias, se comprobaría su consistencia termodinámica y se intentaría a partir de los datos de mezclas binarias, predecir teóricamente los de las mezclas ternarias, comprobándose con los obtenidos experimentalmente.

Se utilizó un adsorbente de uso frecuente en procesos industriales como es el carbón activo, en el que parece - cumplirse las condiciones requeridas para la aplicación al - mismo de los indicados principios de la termodinámica de superficies.

Como diluyente de las mezclas, se pensó en utilizar - helio, dada su nula capacidad de adsorción en las condiciones de presión y temperatura empleadas. Así mismo, se decidió emplear una instalación experimental análoga a la desarrollada previamente en nuestro Departamento, (22, 28, 29), con la incorporación de un cromatografo de gases en serie con ella, a fin de poder analizar con precisión la composición de las mezclas gaseosas.

El programa de investigación planteado y desarrollado fue el siguiente:

a) Obtención de isothermas de adsorción sobre carbón activo - de los componentes puros:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ .

- i) Influencia de la presión
- ii) Influencia de la temperatura
- iii) Influencia de la cantidad de diluyente.

b) Evaluación de la presión superficial para cada componente puro en función de la presión de equilibrio.

i) Influencia de la temperatura.

c) Obtención de las isothermas de adsorción de las mezclas binarias.

i) Influencia de la presión

ii) Influencia de la temperatura.

d) Evaluación de la presión superficial de las mezclas en función de la composición y presión de equilibrio.

i) Influencia de la temperatura.

e) Evaluación de los coeficientes de actividad de las mezclas binarias a partir de los datos experimentales.

i) Presiones de 75 y 100 mm.

ii) Temperatura de 20°C y 50°C.

f) Reproducción de los datos de equilibrio experimentales de adsorción de mezclas binarias mediante las ecuaciones de Wilson y UNIQUAC, desarrolladas para los sistemas liquido-vapor.

g) Obtención de las isothermas de adsorción sobre carbón activo de las posibles mezclas ternarias de los indicados hidrocarburos

i) Influencia de la temperatura.

h) Reproducción de los datos de equilibrio experimentales de adsorción de las mezclas ternarias, mediante las ecuaciones de Wilson y UNIQUAC, utilizando solamente los parámetros obtenidos en las mezclas binarias.

### 3. INSTALACION EXPERIMENTAL

#### 3.1. CARACTERISTICAS GENERALES

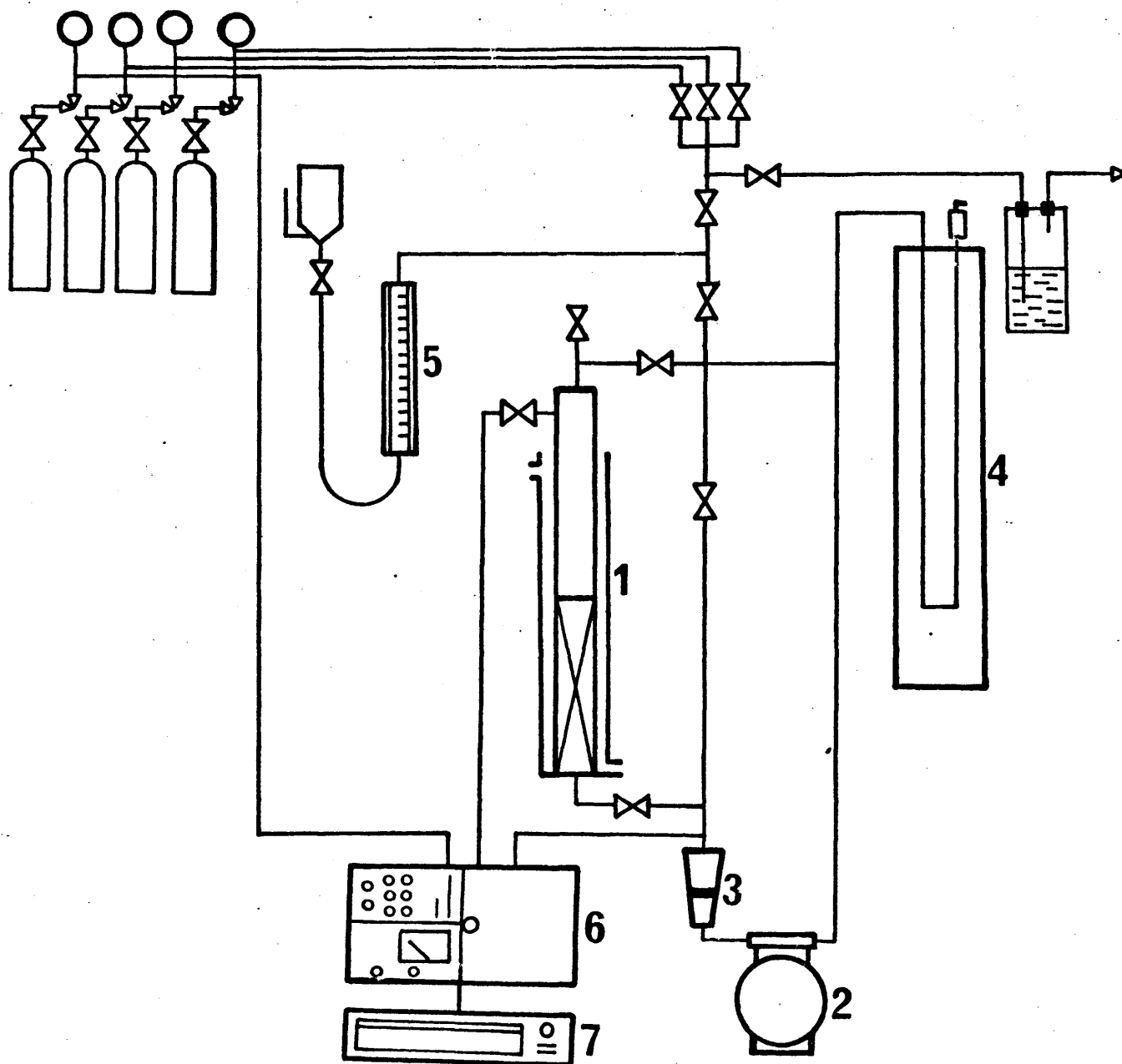
Un esquema de la instalación experimental utilizada, basada en la descrita con todo detalle en una tesis doctoral prévia de nuestro departamento, (28), se muestra en la figura (3-1). Consta de los siguientes elementos integrados en un circuito cerrado totalmente estanco:

##### *Lecho de adsorción*

El lecho de adsorción, 1, es un cilindro de vidrio - pyrex de 5.1 cm. de diámetro interior y 65 cm. de longitud, - en cuya parte inferior lleva soldada una placa porosa de gran apertura de poros, que sirve de soporte al adsorbente, con la menor pérdida de carga posible, la longitud total del lecho - de adsorción es suficiente para impedir el arrastre de partículas, aun en estado de fluidización enérgica, ya que es del orden de diez veces la altura que ocupa el adsorbente en el - lecho; a partir de unos 2 cm. por debajo de la placa porosa, nace una camisa exterior de unos 30 cm. de longitud, con dos tubuladuras que permiten la circulación de líquidos termostados, de modo que todo el lecho absorbente se encuentra a - temperatura constante, esta temperatura se mide a la entrada y salida de la camisa, mediante termómetros de decimas contras tados.

##### *Compresor*

El compresor, 2, que es una pieza fundamental del equipo, debe cumplir los requisitos siguientes:



- 1 LECHO DE ADSORCION
- 2 COMPRESOR
- 3 ROTAMETRO
- 4 MANOMETRO
- 5 BURETA DE GASES
- 6 CROMATOGRAFO
- 7 REGISTRO

FIGURA 3-1

Suministrar el caudal necesario para la fluidización de las partículas del adsorbente empleado, en todas las condiciones de trabajo y poseer una estanqueidad absoluta, pues - las fugas de gas, o su adsorción sobre las partes internas - del mismo falsearían los resultados del experimento, para ello, todas las partes metálicas en contacto con el gas son acero - inoxidable, las uniones entre camaras, los alojamientos de - las válvulas y las conexiones de entrada y salida del gas, - estan hechas con cierres a base de juntas tóricas consiguién-dose una estanqueidad excelente.

La pérdida de carga de la instalación es de solo unos 45-55 cm. de agua, por lo que la relación de compresión sera practicamente 1, cuando el compresor funcione en la instala-ción. El caudal del compresor para la relación de compresión 1, debe ser, según el suministrador, de 5.070 l/h, en condi-ciones normales de presión y temperatura, valor superior al - necesario para fluidización incipiente, que aseguró que el lecho estaba fluidizado.

#### *Instrumentos de medida y control*

El caudal de gas en cada experimento se midió con un rotámetro, 3, de flotador de vidrio, que, previamente se había calibrado utilizando un gasometro contrastado como elemento - absoluto y helio puro de la misma calidad que la utilizada en los ensayos de adsorción.

En la instalación existe un manómetro de mercurio, 4, de 150 cm. de longitud, para medir la presión estática del sistema lleno con mercurio bidestilado. Se dispone de una bureta de gases, 5, de 100 cm<sup>3</sup>, rodeada de una camisa por la que constantemente circula agua a la temperatura del laboratorio, pa-ra mantener el gas que se adiciona al sistema a temperatura - constante.



La carga de gases al sistema se realizó desde varios cilindros con sus respectivos manorreductores, que se conectan a la instalación mediante un tubo fino de vidrio.

Se dispusieron válvulas con el fin de aislar el lecho del resto de la instalación, donde van conectados los aparatos descritos anteriormente.

Se consiguió un elevado grado de estanqueidad, gracias a una construcción muy esmerada de todo el sistema, empleándose vidrio pyrex, llaves y grasa de alto vacío y juntas tóricas de metacrilato en todos aquellos casos en que fué necesario realizar uniones, vidrio-metal ó metal-metal.

A la salida, los gases se descargan a la atmósfera a través de un frasco de burbujeo.

En la conducción de salida de los gases, se situó una conexión para una bomba rotativa de vacío capaz de conseguir una presión absoluta del orden de 0.1 mm de Hg. en el interior de la instalación, con objeto de regenerar el lecho antes de cada nueva experiencia.

Para asegurar una regeneración total, alrededor del lecho y cubriendo con holgura toda su longitud, se instaló una resistencia eléctrica para calefacción, que previamente calibrada nos mantuvo una temperatura lo suficientemente elevada para la regeneración total del adsorbente.

Debido a que la fase gaseosa, fué en todos los casos una mezcla con varios componentes adsorbibles, las variaciones de concentración se midieron en un cromatógrafo de gases, 6, unido en paralelo a la instalación, analizando en cada caso la composición de la mezcla gaseosa.

## *Sistema de análisis*

En el circuito, antes y después del lecho de adsorción, se dispusieron sendas válvulas, con objeto de desviar parte de la corriente de gas hacia el sistema de análisis, del que retorna siempre al circuito cerrado. Dicho sistema es tá formado por: una válvula de toma de muestras gaseosas de volumen constante, un rotámetro que precede a dicha válvula, con el fin de asegurarnos un caudal de circulación constante, un cromatógrafo de gases con detector de conductividad térmica, 6, y un registrador, 7. Las condiciones de operación de este sistema de análisis, abarcan suficientemente los límites de trabajo de nuestra instalación, comprendidas en un intervalo de presiones totales absolutas de 0 a 1.000 mm. de Hg.

## 4. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO

### 4.1. ADSORBENTE

Se eligió como adsorbente un carbón activo AC-40, - por su elevada capacidad de adsorción para los gases elegidos, lo que permitió realizar las medidas con suficiente precisión. Por otra parte, este adsorbente es quizás uno de los más utilizados industrialmente.

La cantidad total de adsorbente empleado fué en todos los experimentos de 50 gr. en forma de pastillas cilíndricas - de diámetro medio 0.25 mm. y con las características físicas y geométricas que se detallan en el apendice 9.1.2. El adsorbente se encuentra siempre fluidizado durante la adsorción.

### 4.2. MEZCLAS GASEOSAS

Con los gases elegidos, podían estudiarse las isotermas de adsorción de las mezclas binarias, Metano ( $M^-$ )-Etileno ( $E^-$ ), Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ ), Metano ( $M^-$ )-Etano ( $E^-$ ), Etileno ( $E^-$ )-Propileno ( $P^-$ ), Etano ( $E^-$ )-Propileno ( $P^-$ ) y de las ternarias, Metano ( $M^-$ )-Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ ) y Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ )-Propileno ( $P^-$ ).

Todas ellas, se prepararon diluidas con helio cuya adsorción en el adsorbente utilizado era despreciable y que equivalía al hidrógeno diluyente de los gases de craqueo y residuales, que en la práctica implican los adsorbatos estudiados.

Las mezclas gaseosas se prepararon utilizando siempre compuestos individuales de gran pureza, apendice 9.1.1., para

evitar interferencias en las medidas

#### 4.3. PROCEDIMIENTO OPERATIVO

Previamente a las medidas de adsorción, y siendo fundamental la estanqueidad de la instalación, fué necesario realizar medidas de la misma a presiones comprendidas entre  $10^{-2}$  mm. y 1100 mm. de Hg. Se llevaron a cabo introduciendo helio en la instalación a diferentes presiones y observando las variaciones de las mismas con el tiempo. Cada medida se prolongó durante 72 horas, considerando la estanqueidad aceptable - si las variaciones de presión resultaban de  $\pm 0.1$  mm/h o inferiores.

Una vez comprobada la estanqueidad, se desgasificaba la instalación y se regeneraba el adsorbente a fin de poder realizar medidas reproducibles. La desgasificación se lograba conectando todo el sistema a una bomba rotativa de vacío, con la que se conseguía una presión absoluta inferior a 0.1 mm. de Hg., manteniéndose el vacío al menos durante 24 horas. Para desorber cualquier producto que pudiera quedar en el adsorbente, particularmente, metano, etileno, etano ó propileno, adsorbido en operaciones procedentes, se regeneraba el lecho de adsorción sometiéndole a presión absoluta de 0.1 mm. de Hg y temperatura de  $275^{\circ}\text{C}$ , durante un período que oscilaba entre 8 y 12 horas según la cantidad de gas adsorbida, a cuyo fin - alrededor de la camisa del lecho adsorbente, existía una resistencia de calefacción debidamente arrollada y rodeada de un aislante de amianto. A medida que el lecho desorbía aumentaba la presión en la instalación, volviéndose al valor absoluto de 0.1 mm. de Hg. con ayuda de la bomba rotativa de vacío; esta operación se repetía, manteniendo la calefacción, hasta que la presión de 0.1 mm. de Hg. no variaba al menos durante 2 horas. De esta forma las características de adsorción del adsorbente son similares antes y después de cada experimento.

Una vez regenerado el adsorbente y desgasificada la instalación, se purgaba la conducción desde la botella a la - instalación hasta asegurarse de que el gas que se inyectaba - en la misma era helio puro, manipulándose las llaves correspondiente para llenar el conjunto con este gas hasta alcanzar una presión absoluta en la instalación de 200 mm. de Hg. presión que permanecía constante en todos los experimentos. A continuación, se conectaba la camisa del lecho al baño termostatado y se hacía circular por ella el líquido refrigerante o - calefactor, hasta que su temperatura se estabilizaba en el valor apropiado para el experimento. La circulación se mantenía durante todo el tiempo que duraba el experimento de adsorción.

La temperatura del laboratorio se mantuvo a 20°C durante todos los experimentos, merced a un sistema de acondicionamiento de aire. Se obtuvieron variaciones máximas de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  a lo largo de cada experimento.

Así mismo, se requería que el sistema de análisis, estuviese en condiciones totalmente estables de presión, temperatura y caudales de gas portador, en todas y cada una de las - partes del cromatógrafo, durante el período de tiempo que duraba un experimento.

Las condiciones de análisis variaron con las mezclas gaseosas siendo las más frecuentes las que se detallan en el - apéndice 9.2.3.

#### 4.3.1. EXPERIMENTOS DE LECHO FLUIDIZADO

Previamente a la realización de los experimentos definitivos, fué necesario determinar el volumen total de la instalación y el volumen del lecho de adsorción, resultando unos valores de  $1881\text{ cm}^3$  y  $58\text{ cm}^3$  respectivamente, de acuerdo con los resultados que se indican en los apéndices 9.2.2. y 9.2.1. A - continuación, se lavaban las conducciones y la bureta de gases con helio a fin de arrastrar los posibles indicios de otros ad

sorbatos en las mismas y tener la seguridad de que el gas que se introducía era adsorbato puro en cada caso. Una vez introducido el gas diluyente en la instalación, se cerraban las tres llaves que aislan el lecho del resto de la instalación y se abría la llave de la conexión en derivación. Se introducían entonces unas cantidades medidas de adsorbatos en la zona derecha de la instalación, a continuación, se ponía en marcha el compresor a fin de homogeneizar la mezcla diluyente-adsorbatos. Se cerraba entonces la llave en derivación y se abrían las que comunicaban el lecho con la instalación, apreciándose un descenso de presión, con respecto a la inicial, teóricamente calculada, que paulatinamente iba decreciendo, hasta alcanzar un valor constante, indicativo de que se había alcanzado el equilibrio. Durante este tiempo, que solía durar 20 minutos, el compresor funcionaba periódicamente cada 2 minutos y por espacio de 10 ó 15 s. como máximo, a fin de que el calentamiento de la mezcla gaseosa fuera lo más pequeño posible.

Una vez alcanzado el equilibrio, se tomaba una muestra de la mezcla gaseosa mediante la válvula de gases y se analizaba, repitiendo la operación cinco veces para cada punto de equilibrio, para tener la certeza de que la presión permanecía constante. Una vez conocida la presión y composición de la mezcla gaseosa, por diferencia con respecto a la cantidad de adsorbatos introducida al comienzo, se calculaba la cantidad adsorbida de los mismos en cada experimento. Un análisis de cada uno de los tipos de mezclas utilizados y los cálculos necesarios para determinar las cantidades adsorbidas y presiones de equilibrio se detalla en el apéndice 9.2.4.

En todos los experimentos de adsorción de mezclas, las proporciones de cada adsorbato se fijaban a priori y se mantenían constantes durante el transcurso de la isoterma, homogeneizándose en la zona derecha de la instalación, antes de ponerlas en contacto con el lecho adsorbente. Añadiendo nuevas cantidades de adsorbatos en las proporciones fijadas y repitiendo el proceso descrito, se van obteniendo los sucesivos puntos experimentales de equilibrio de las isotermas de adsorción.

En algunas ocasiones, se interrumpió la adición de -  
alguno de los adsorbatos a fin de investigar el efecto del -  
desplazamiento de adsorbatos en el adsorbente.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. ISOTERMAS DE ADSORCION

Se han determinado las isothermas de adsorción de los adsorbatos puros: Metano ( $M^-$ ), Etileno ( $E^-$ ), Etano ( $E^-$ ) y Propileno ( $P^-$ ), así como las isothermas de las mezclas binarias: Metano ( $M^-$ )-Etileno ( $E^-$ ), Metano ( $M^-$ )-Etano ( $E^-$ ), Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ ), Etileno ( $E^-$ )-Propileno ( $P^-$ ) y Etano ( $E^-$ )-Propileno ( $P^-$ ) y las mezclas ternarias: Metano ( $M^-$ )-Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ ) y Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ )-Propileno ( $P^-$ ). Todas a temperaturas de 20° y 50°C y presiones comprendidas entre 0 y 750 mm. de Hg.

Las isothermas de las mezclas corresponden a una relación inicial fija de volúmenes de adsorbatos  $V_1:V_2$ .

Los parámetros fundamentales de estas isothermas se calcularon del modo indicado en el apartado 9.2.4. de la presente memoria.

#### 5.1.1. COMPONENTES PUROS

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 5-1 a 5-4, respectivamente.



TABLA 5.1

Isoterma de adsorción: Metano ( $M^-$ )

T=20°C		T=50°C	
$P_{M^-}$	$N_{tM^-}$	$P_{M^-}$	$N_{tM^-}$
63.27	$4.206 \cdot 10^{-3}$	80.00	$2.865 \cdot 10^{-3}$
131.70	$7.909 \cdot 10^{-3}$	102.78	$3.804 \cdot 10^{-3}$
199.12	$1.169 \cdot 10^{-2}$	208.80	$7.145 \cdot 10^{-3}$
272.95	$1.485 \cdot 10^{-2}$	288.34	$9.790 \cdot 10^{-3}$
344.53	$1.823 \cdot 10^{-2}$	370.71	$1.1680 \cdot 10^{-2}$
420.05	$2.121 \cdot 10^{-2}$	451.10	$1.4095 \cdot 10^{-2}$
495.14	$2.425 \cdot 10^{-2}$	562.90	$1.6900 \cdot 10^{-2}$
571.83	$2.712 \cdot 10^{-2}$	649.20	$1.8750 \cdot 10^{-2}$
653.87	$2.947 \cdot 10^{-2}$	737.70	$2.0415 \cdot 10^{-2}$
761.09	$3.282 \cdot 10^{-2}$	797.30	$2.1425 \cdot 10^{-2}$
mm.	moles	mm.	moles

TABLA 5.2

Isoterma de adsorción: Etileno ( $E^=$ )

T=20°C		T=50°C	
$P_{E^=}$	$N_{tE^=}$	$P_{E^=}$	$N_{tE^=}$
4.10	$6.500 \cdot 10^{-3}$	6.50	$3.730 \cdot 10^{-2}$
17.99	$1.592 \cdot 10^{-2}$	27.17	$1.123 \cdot 10^{-2}$
52.09	$3.029 \cdot 10^{-2}$	42.05	$1.577 \cdot 10^{-2}$
125.00	$4.399 \cdot 10^{-2}$	68.22	$2.106 \cdot 10^{-2}$
181.44	$5.252 \cdot 10^{-2}$	109.50	$2.741 \cdot 10^{-2}$
242.32	$6.056 \cdot 10^{-2}$	173.27	$3.586 \cdot 10^{-2}$
309.34	$6.796 \cdot 10^{-2}$	184.38	$3.730 \cdot 10^{-2}$
384.10	$7.459 \cdot 10^{-2}$	251.06	$4.458 \cdot 10^{-2}$
465.00	$8.060 \cdot 10^{-2}$	324.68	$5.145 \cdot 10^{-2}$
546.12	$8.659 \cdot 10^{-2}$	344.13	$5.321 \cdot 10^{-2}$
632.00	$9.209 \cdot 10^{-2}$	426.23	$5.845 \cdot 10^{-2}$
728.00	$9.658 \cdot 10^{-2}$	520.69	$6.527 \cdot 10^{-2}$
		760.82	$7.750 \cdot 10^{-2}$
mm.	moles	mm.	moles

TABLA 5.3

Isoterma de adsorción: Etano ( $E^-$ )

T=20°C		T=50°C	
$P_{E^-}$	$N_{tE^-}$	$P_{E^-}$	$N_{tE^-}$
1.80	$5.900 \cdot 10^{-3}$	2.70	$2.520 \cdot 10^{-3}$
4.75	$1.009 \cdot 10^{-2}$	10.50	$7.850 \cdot 10^{-3}$
25.67	$2.564 \cdot 10^{-2}$	48.41	$1.872 \cdot 10^{-2}$
56.13	$3.800 \cdot 10^{-2}$	152.54	$3.597 \cdot 10^{-2}$
85.38	$4.608 \cdot 10^{-2}$	251.53	$4.651 \cdot 10^{-2}$
143.14	$5.597 \cdot 10^{-2}$	356.47	$5.600 \cdot 10^{-2}$
208.42	$6.700 \cdot 10^{-2}$	470.78	$6.400 \cdot 10^{-2}$
282.90	$7.708 \cdot 10^{-2}$	590.13	$7.105 \cdot 10^{-2}$
374.80	$8.539 \cdot 10^{-2}$	697.26	$7.630 \cdot 10^{-2}$
463.74	$9.401 \cdot 10^{-2}$		
564.04	$1.015 \cdot 10^{-1}$		
680.93	$1.073 \cdot 10^{-1}$		
737.32	$1.087 \cdot 10^{-1}$		
mm.	moles	mm.	moles

TABLA 5.4

Isoterma de adsorción: Propileno ( $P^\circ$ )

T=20°C		T=50°C	
$P_{P^\circ}$	$N_{t_{P^\circ}}$	$P_{P^\circ}$	$N_{t_{P^\circ}}$
0.24	$1.390 \cdot 10^{-2}$	2.50	$1.448 \cdot 10^{-2}$
2.56	$3.105 \cdot 10^{-2}$	6.00	$2.151 \cdot 10^{-2}$
12.80	$5.090 \cdot 10^{-2}$	28.39	$4.402 \cdot 10^{-2}$
30.03	$7.005 \cdot 10^{-2}$	64.62	$6.426 \cdot 10^{-2}$
64.90	$9.095 \cdot 10^{-2}$	130.64	$8.314 \cdot 10^{-2}$
122.19	$1.095 \cdot 10^{-1}$	209.31	$9.995 \cdot 10^{-2}$
209.14	$1.252 \cdot 10^{-1}$	402.28	$1.241 \cdot 10^{-1}$
327.70	$1.377 \cdot 10^{-1}$	518.97	$1.309 \cdot 10^{-1}$
463.78	$1.486 \cdot 10^{-1}$		
618.47	$1.575 \cdot 10^{-1}$		
713.63	$1.620 \cdot 10^{-1}$		
mm.	moles	mm.	moles

### 5.1.2. MEZCLAS BINARIAS

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 5-5a a 5-9b, respectivamente.

TABLA 5-5a

Isotermas de adsorción: Metano ( $M^-$ )-Etileno ( $E^-$ )

T=20°C

$V_{M^-}:V_{E^-}$	$P_{M^-}$	$P_{E^-}$	$n_{M^-}$	$n_{E^-}$
10:1	74.33	0.68	$5.382 \cdot 10^{-3}$	$1.206 \cdot 10^{-3}$
"	99.00	1.01	$6.717 \cdot 10^{-3}$	$1.557 \cdot 10^{-3}$
"	224.86	2.73	$1.266 \cdot 10^{-2}$	$3.230 \cdot 10^{-3}$
"	476.89	7.07	$2.262 \cdot 10^{-2}$	$6.305 \cdot 10^{-3}$
"	752.32	12.52	$3.017 \cdot 10^{-2}$	$9.270 \cdot 10^{-3}$
4:1	85.64	2.44	$5.525 \cdot 10^{-3}$	$3.266 \cdot 10^{-3}$
"	182.43	6.99	$9.920 \cdot 10^{-3}$	$6.325 \cdot 10^{-3}$
"	280.14	9.85	$1.420 \cdot 10^{-2}$	$9.550 \cdot 10^{-3}$
"	383.52	14.98	$1.791 \cdot 10^{-2}$	$1.255 \cdot 10^{-2}$
"	492.89	20.76	$2.101 \cdot 10^{-2}$	$1.548 \cdot 10^{-2}$
"	604.47	28.23	$2.392 \cdot 10^{-2}$	$1.825 \cdot 10^{-2}$
"	719.95	35.78	$2.642 \cdot 10^{-2}$	$2.101 \cdot 10^{-2}$
30:1	74.85	0.15	$5.670 \cdot 10^{-3}$	$3.692 \cdot 10^{-4}$
"	99.75	0.25	$6.999 \cdot 10^{-3}$	$4.786 \cdot 10^{-4}$
"	224.60	1.07	$1.270 \cdot 10^{-2}$	$9.975 \cdot 10^{-4}$

TABLA 5-5a (continuación)

$V_M^- : V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$
30:1	481.88	2.22	$2.221 \cdot 10^{-2}$	$1.986 \cdot 10^{-3}$
"	754.49	3.96	$3.018 \cdot 10^{-2}$	$2.915 \cdot 10^{-3}$
1:2	48.56	11.92	$2.221 \cdot 10^{-3}$	$1.293 \cdot 10^{-2}$
"	130.49	50.80	$4.634 \cdot 10^{-3}$	$3.023 \cdot 10^{-2}$
"	221.48	107.14	$6.110 \cdot 10^{-3}$	$4.577 \cdot 10^{-2}$
"	308.02	184.86	$8.055 \cdot 10^{-3}$	$5.920 \cdot 10^{-2}$
"	405.53	273.60	$8.910 \cdot 10^{-3}$	$7.150 \cdot 10^{-2}$
"	470.13	338.45	$9.510 \cdot 10^{-3}$	$7.915 \cdot 10^{-2}$
1:5	40.43	34.58	$1.736 \cdot 10^{-3}$	$2.554 \cdot 10^{-2}$
"	51.13	48.27	$1.944 \cdot 10^{-3}$	$3.047 \cdot 10^{-2}$
"	112.41	148.53	$2.865 \cdot 10^{-3}$	$5.570 \cdot 10^{-2}$
"	169.91	292.40	$3.966 \cdot 10^{-3}$	$7.304 \cdot 10^{-2}$
"	236.44	465.36	$4.269 \cdot 10^{-3}$	$8.873 \cdot 10^{-2}$
"	266.26	563.75	$4.776 \cdot 10^{-3}$	$9.598 \cdot 10^{-2}$
2:1	71.50	3.50	$4.559 \cdot 10^{-3}$	$5.543 \cdot 10^{-3}$
"	94.90	5.10	$5.685 \cdot 10^{-3}$	$7.083 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-5a (continuación)

$V_M^- : V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$
2;1	135.98	8.51	$7.540 \cdot 10^{-3}$	$9.695 \cdot 10^{-3}$
"	286.41	24.53	$1.358 \cdot 10^{-2}$	$1.864 \cdot 10^{-2}$
"	462.19	46.22	$1.707 \cdot 10^{-2}$	$2.701 \cdot 10^{-2}$
"	631.22	73.55	$2.124 \cdot 10^{-2}$	$3.480 \cdot 10^{-2}$



TABLA 5-5b

Isotermas de adsorción: Metano ( $M^-$ )-Etileno ( $E^-$ )

T=50°C

$V_{M^-}:V_{E^-}$	$P_{M^-}$	$P_{E^-}$	$n_{M^-}$	$n_{E^-}$
8:1	73.81	1.19	$2.553 \cdot 10^{-3}$	$1.160 \cdot 10^{-3}$
"	213.16	5.29	$6.665 \cdot 10^{-3}$	$2.959 \cdot 10^{-3}$
"	432.58	14.30	$1.267 \cdot 10^{-2}$	$5.540 \cdot 10^{-3}$
"	664.32	23.42	$1.742 \cdot 10^{-2}$	$8.105 \cdot 10^{-3}$
1:5	28.45	38.02	$6.590 \cdot 10^{-4}$	$1.370 \cdot 10^{-2}$
"	59.19	95.13	$1.076 \cdot 10^{-3}$	$2.547 \cdot 10^{-2}$
"	86.99	170.14	$1.794 \cdot 10^{-3}$	$3.545 \cdot 10^{-2}$
"	119.21	257.07	$2.071 \cdot 10^{-3}$	$4.423 \cdot 10^{-2}$
"	146.92	349.16	$2.805 \cdot 10^{-3}$	$5.255 \cdot 10^{-2}$
"	179.71	447.64	$3.024 \cdot 10^{-3}$	$6.025 \cdot 10^{-2}$
"	207.62	552.57	$3.737 \cdot 10^{-3}$	$6.725 \cdot 10^{-2}$
1:2	55.24	28.49	$1.530 \cdot 10^{-3}$	$1.123 \cdot 10^{-2}$
"	115.00	71.84	$2.109 \cdot 10^{-3}$	$2.096 \cdot 10^{-2}$
"	171.92	128.63	$3.987 \cdot 10^{-3}$	$2.938 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-5b (continuación)

$V_M^- : V_E^-$	$P_M'$	$P_E'$	$n_M^-$	$n_E^-$
1:2	238.00	191.31	$4.424 \cdot 10^{-3}$	$3.717 \cdot 10^{-2}$
"	292.42	262.05	$6.025 \cdot 10^{-3}$	$4.416 \cdot 10^{-2}$
"	357.65	334.41	$6.550 \cdot 10^{-3}$	$5.100 \cdot 10^{-2}$
"	385.42	374.43	$7.290 \cdot 10^{-3}$	$5.405 \cdot 10^{-2}$
50:1	74.55	0.45	$2.923 \cdot 10^{-3}$	$3.666 \cdot 10^{-4}$
"	154.13	1.42	$5.250 \cdot 10^{-3}$	$7.120 \cdot 10^{-4}$
"	313.01	3.46	$1.015 \cdot 10^{-2}$	$1.359 \cdot 10^{-3}$
"	481.19	5.14	$1.475 \cdot 10^{-2}$	$2.018 \cdot 10^{-3}$
"	674.29	7.88	$1.960 \cdot 10^{-2}$	$2.571 \cdot 10^{-3}$
2:1	68.10	6.91	$2.189 \cdot 10^{-3}$	$3.833 \cdot 10^{-3}$
"	106.60	12.20	$3.295 \cdot 10^{-3}$	$5.765 \cdot 10^{-3}$
"	216.60	29.75	$6.300 \cdot 10^{-3}$	$1.101 \cdot 10^{-2}$
"	328.40	49.70	$9.115 \cdot 10^{-3}$	$1.601 \cdot 10^{-2}$
"	442.80	74.10	$1.167 \cdot 10^{-2}$	$2.055 \cdot 10^{-2}$
"	562.40	98.90	$1.372 \cdot 10^{-2}$	$2.506 \cdot 10^{-2}$
"	619.25	112.40	$1.502 \cdot 10^{-2}$	$2.720 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-6a

Isotermas de adsorción: Metano ( $M^-$ )-Etano ( $E^-$ ) $T=20^\circ\text{C}$ 

$V_{M^-}:V_{E^-}$	$P_{M^-}$	$P_{E^-}$	$n_{M^-}$	$n_{E^-}$
1:6	38.41	26.69	$1.518 \cdot 10^{-3}$	$2.559 \cdot 10^{-2}$
"	51.35	40.35	$1.846 \cdot 10^{-3}$	$3.507 \cdot 10^{-2}$
"	93.72	76.68	$2.446 \cdot 10^{-3}$	$4.960 \cdot 10^{-2}$
"	175.64	145.46	$3.040 \cdot 10^{-3}$	$6.766 \cdot 10^{-2}$
"	268.84	226.26	$3.543 \cdot 10^{-3}$	$8.287 \cdot 10^{-2}$
"	364.14	306.46	$3.905 \cdot 10^{-3}$	$9.372 \cdot 10^{-2}$
1:3	28.30	7.50	$1.170 \cdot 10^{-3}$	$8.828 \cdot 10^{-3}$
"	54.40	14.50	$1.978 \cdot 10^{-3}$	$1.507 \cdot 10^{-2}$
"	92.12	26.00	$3.389 \cdot 10^{-3}$	$2.634 \cdot 10^{-2}$
"	168.00	47.90	$5.242 \cdot 10^{-3}$	$4.156 \cdot 10^{-2}$
"	275.80	79.60	$7.022 \cdot 10^{-3}$	$5.624 \cdot 10^{-2}$
"	392.00	114.50	$8.525 \cdot 10^{-3}$	$6.969 \cdot 10^{-2}$
"	529.40	155.40	$9.757 \cdot 10^{-3}$	$7.975 \cdot 10^{-2}$
11:1	51.00	0.10	$3.480 \cdot 10^{-3}$	$6.238 \cdot 10^{-4}$
"	92.32	0.18	$6.379 \cdot 10^{-3}$	$1.126 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-6a (continuación)

$V_M^- : V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$
11:1	155.80	0.31	$1.032 \cdot 10^{-2}$	$1.864 \cdot 10^{-3}$
"	298.20	0.90	$1.779 \cdot 10^{-2}$	$3.239 \cdot 10^{-3}$
"	415.50	1.31	$2.306 \cdot 10^{-2}$	$4.166 \cdot 10^{-3}$
"	556.50	1.70	$2.840 \cdot 10^{-2}$	$5.210 \cdot 10^{-3}$
"	697.60	2.81	$3.402 \cdot 10^{-2}$	$6.288 \cdot 10^{-3}$
8:1	67.23	0.27	$4.441 \cdot 10^{-3}$	$1.659 \cdot 10^{-3}$
"	117.63	0.47	$7.599 \cdot 10^{-3}$	$2.811 \cdot 10^{-3}$
"	220.39	1.11	$1.303 \cdot 10^{-2}$	$4.845 \cdot 10^{-3}$
"	366.16	1.84	$1.869 \cdot 10^{-2}$	$7.019 \cdot 10^{-3}$
"	516.00	3.11	$2.527 \cdot 10^{-2}$	$9.538 \cdot 10^{-3}$
"	693.91	4.90	$3.123 \cdot 10^{-2}$	$1.185 \cdot 10^{-2}$
2.5:1	59.20	0.80	$3.331 \cdot 10^{-3}$	$2.770 \cdot 10^{-3}$
"	111.40	1.70	$6.528 \cdot 10^{-3}$	$5.472 \cdot 10^{-3}$
"	193.10	3.14	$1.097 \cdot 10^{-2}$	$9.231 \cdot 10^{-3}$
"	292.80	5.06	$1.583 \cdot 10^{-2}$	$1.338 \cdot 10^{-2}$
"	425.00	7.78	$2.128 \cdot 10^{-2}$	$1.798 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-6a (continuación)

$V_M^- : V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$
2.5:1	555.00	10.80	$2.571 \cdot 10^{-2}$	$2.190 \cdot 10^{-2}$
"	683.10	13.90	$2.940 \cdot 10^{-2}$	$2.504 \cdot 10^{-2}$
1.5:1	34.03	0.76	$2.091 \cdot 10^{-3}$	$3.340 \cdot 10^{-3}$
"	85.50	2.10	$4.640 \cdot 10^{-3}$	$7.570 \cdot 10^{-3}$
"	124.40	6.54	$5.844 \cdot 10^{-3}$	$1.277 \cdot 10^{-2}$
"	246.00	13.80	$1.036 \cdot 10^{-2}$	$2.306 \cdot 10^{-2}$
"	337.80	19.30	$1.312 \cdot 10^{-2}$	$2.975 \cdot 10^{-2}$
"	442.80	27.80	$1.661 \cdot 10^{-2}$	$3.840 \cdot 10^{-2}$
"	660.00	41.40	$2.034 \cdot 10^{-2}$	$4.723 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-6b

Isotermas de adsorción: Metano ( $M^-$ )-Etano ( $E^-$ )

$T=50^{\circ}\text{C}$

$V_{M^-}:V_{E^-}$	$P_{M^-}'$	$P_{E^-}'$	$n_{M^-}$	$n_{E^-}$
8:1	70.06	0.63	$2.972 \cdot 10^{-3}$	$1.438 \cdot 10^{-3}$
"	171.40	1.73	$6.611 \cdot 10^{-3}$	$3.242 \cdot 10^{-3}$
"	296.30	5.12	$1.024 \cdot 10^{-2}$	$5.042 \cdot 10^{-3}$
"	441.80	9.48	$1.375 \cdot 10^{-2}$	$6.836 \cdot 10^{-3}$
"	600.20	12.90	$1.688 \cdot 10^{-2}$	$8.425 \cdot 10^{-3}$
"	709.10	21.18	$1.875 \cdot 10^{-2}$	$9.402 \cdot 10^{-3}$
30:1	53.09	0.11	$1.864 \cdot 10^{-3}$	$2.959 \cdot 10^{-4}$
"	107.40	0.21	$3.745 \cdot 10^{-3}$	$6.150 \cdot 10^{-4}$
"	177.70	0.53	$5.990 \cdot 10^{-3}$	$9.994 \cdot 10^{-4}$
"	304.90	1.22	$9.502 \cdot 10^{-3}$	$1.598 \cdot 10^{-3}$
"	447.80	2.25	$1.304 \cdot 10^{-2}$	$2.229 \cdot 10^{-3}$
"	584.50	3.50	$1.606 \cdot 10^{-2}$	$2.745 \cdot 10^{-3}$
"	714.50	5.02	$1.826 \cdot 10^{-2}$	$3.452 \cdot 10^{-3}$
4.5:1	60.57	1.42	$2.064 \cdot 10^{-3}$	$2.336 \cdot 10^{-3}$
"	111.60	3.21	$3.485 \cdot 10^{-3}$	$4.025 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-6b (continuación)

$V_M^- : V_E^-$	$P_M'$	$P_E'$	$n_M^-$	$n_E^-$
4.5:1	169.90	5.25	$5.498 \cdot 10^{-3}$	$6.402 \cdot 10^{-3}$
"	250.80	10.18	$6.893 \cdot 10^{-3}$	$8.517 \cdot 10^{-3}$
"	374.70	15.21	$9.236 \cdot 10^{-3}$	$1.097 \cdot 10^{-2}$
"	518.60	21.61	$1.141 \cdot 10^{-2}$	$1.394 \cdot 10^{-2}$
"	662.60	29.77	$1.339 \cdot 10^{-2}$	$1.636 \cdot 10^{-2}$
1:5	13.26	21.64	$2.726 \cdot 10^{-4}$	$7.987 \cdot 10^{-3}$
"	37.40	63.67	$5.380 \cdot 10^{-4}$	$1.801 \cdot 10^{-2}$
"	60.06	104.00	$6.988 \cdot 10^{-4}$	$2.518 \cdot 10^{-2}$
"	94.10	164.40	$8.004 \cdot 10^{-4}$	$3.400 \cdot 10^{-2}$
"	138.00	245.00	$8.417 \cdot 10^{-4}$	$4.346 \cdot 10^{-2}$
"	213.20	394.30	$1.005 \cdot 10^{-3}$	$5.484 \cdot 10^{-2}$
1:2	42.48	12.54	$8.168 \cdot 10^{-4}$	$5.933 \cdot 10^{-3}$
"	85.75	26.05	$1.242 \cdot 10^{-3}$	$1.026 \cdot 10^{-2}$
"	184.50	57.00	$2.046 \cdot 10^{-3}$	$1.821 \cdot 10^{-2}$
"	267.20	82.60	$2.543 \cdot 10^{-3}$	$2.395 \cdot 10^{-2}$
"	357.40	112.20	$3.041 \cdot 10^{-3}$	$2.931 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-6b (continuación)

$V_M^- : V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$
1:2	425.30	136.50	$3.287 \cdot 10^{-3}$	$3.323 \cdot 10^{-2}$
"	523.90	181.20	$3.696 \cdot 10^{-3}$	$3.830 \cdot 10^{-2}$
1.5:1	61.42	4.98	$1.785 \cdot 10^{-3}$	$5.715 \cdot 10^{-3}$
"	128.90	10.90	$3.042 \cdot 10^{-3}$	$9.958 \cdot 10^{-3}$
"	212.30	18.71	$4.380 \cdot 10^{-3}$	$1.458 \cdot 10^{-2}$
"	294.13	26.97	$5.481 \cdot 10^{-3}$	$1.856 \cdot 10^{-2}$
"	386.00	37.17	$6.635 \cdot 10^{-3}$	$2.272 \cdot 10^{-2}$
"	488.67	48.33	$7.762 \cdot 10^{-3}$	$2.689 \cdot 10^{-2}$
"	602.65	71.45	$8.760 \cdot 10^{-3}$	$3.124 \cdot 10^{-2}$



TABLA 5-7a

Isotermas de adsorción: Etileno ( $E^{\equiv}$ )-Etano ( $E^{-}$ )

T=20°C

$V_{E^{\equiv}}:V_{E^{-}}$	$P'_{E^{\equiv}}$	$P'_{E^{-}}$	$n_{E^{\equiv}}$	$n_{E^{-}}$
1:1	46.50	28.50	$1.687 \cdot 10^{-2}$	$1.855 \cdot 10^{-2}$
"	59.81	37.77	$1.929 \cdot 10^{-2}$	$2.118 \cdot 10^{-2}$
"	117.17	76.06	$2.658 \cdot 10^{-2}$	$3.010 \cdot 10^{-2}$
"	181.45	126.27	$3.325 \cdot 10^{-2}$	$3.799 \cdot 10^{-2}$
"	236.30	168.77	$3.770 \cdot 10^{-2}$	$4.352 \cdot 10^{-2}$
"	312.65	217.89	$4.030 \cdot 10^{-2}$	$4.842 \cdot 10^{-2}$
"	383.85	271.52	$4.334 \cdot 10^{-2}$	$5.297 \cdot 10^{-2}$
"	430.49	306.68	$4.545 \cdot 10^{-2}$	$5.607 \cdot 10^{-2}$
2:1	71.65	22.74	$2.437 \cdot 10^{-2}$	$1.328 \cdot 10^{-2}$
"	123.29	40.73	$3.214 \cdot 10^{-2}$	$1.782 \cdot 10^{-2}$
"	181.17	61.15	$3.939 \cdot 10^{-2}$	$2.216 \cdot 10^{-2}$
"	247.83	85.05	$4.588 \cdot 10^{-2}$	$2.622 \cdot 10^{-2}$
"	339.21	113.37	$5.022 \cdot 10^{-2}$	$2.989 \cdot 10^{-2}$
"	420.67	145.70	$5.547 \cdot 10^{-2}$	$3.322 \cdot 10^{-2}$
"	499.28	174.52	$6.093 \cdot 10^{-2}$	$3.685 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-7a (continuación)

$V_E = : V_E^-$	$P_E^+$	$P_E^-$	$n_E^+$	$n_E^-$
1:2	33.30	41.70	$1.161 \cdot 10^{-2}$	$2.533 \cdot 10^{-2}$
"	36.77	46.29	$1.216 \cdot 10^{-2}$	$2.667 \cdot 10^{-2}$
"	81.79	105.66	$1.749 \cdot 10^{-2}$	$3.995 \cdot 10^{-2}$
"	116.62	153.61	$2.063 \cdot 10^{-2}$	$4.807 \cdot 10^{-2}$
"	153.16	210.39	$2.361 \cdot 10^{-2}$	$5.547 \cdot 10^{-2}$
"	192.87	275.63	$2.633 \cdot 10^{-2}$	$6.209 \cdot 10^{-2}$
"	236.73	346.95	$2.868 \cdot 10^{-2}$	$6.824 \cdot 10^{-2}$
"	290.76	417.37	$3.016 \cdot 10^{-2}$	$7.443 \cdot 10^{-2}$
4:1	43.86	7.35	$2.056 \cdot 10^{-2}$	$5.448 \cdot 10^{-3}$
"	135.41	22.53	$3.697 \cdot 10^{-2}$	$1.021 \cdot 10^{-2}$
"	187.91	31.50	$4.459 \cdot 10^{-2}$	$1.246 \cdot 10^{-2}$
"	252.46	42.93	$5.117 \cdot 10^{-2}$	$1.451 \cdot 10^{-2}$
"	333.23	54.60	$5.637 \cdot 10^{-2}$	$1.654 \cdot 10^{-2}$
"	412.21	66.19	$6.171 \cdot 10^{-2}$	$1.856 \cdot 10^{-2}$
"	485.98	79.33	$6.751 \cdot 10^{-2}$	$2.046 \cdot 10^{-2}$
"	571.25	96.03	$7.233 \cdot 10^{-2}$	$2.206 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-7a (continuación)

$V_E = V_{E^-}$	$P_E^+$	$P_{E^-}^+$	$n_E^+$	$n_{E^-}$
1:4	12.66	39.26	$4.949 \cdot 10^{-3}$	$2.680 \cdot 10^{-2}$
"	40.68	128.79	$8.561 \cdot 10^{-3}$	$4.919 \cdot 10^{-2}$
"	58.92	189.59	$1.000 \cdot 10^{-2}$	$5.899 \cdot 10^{-2}$
"	81.39	261.11	$1.108 \cdot 10^{-2}$	$6.789 \cdot 10^{-2}$
"	101.05	341.83	$1.239 \cdot 10^{-2}$	$7.598 \cdot 10^{-2}$
"	125.74	429.90	$1.328 \cdot 10^{-2}$	$8.346 \cdot 10^{-2}$
"	148.04	528.91	$1.437 \cdot 10^{-2}$	$8.996 \cdot 10^{-2}$
8:1	69.80	5.20	$2.763 \cdot 10^{-2}$	$3.765 \cdot 10^{-3}$
"	123.80	9.93	$3.790 \cdot 10^{-2}$	$5.212 \cdot 10^{-3}$
"	228.66	19.96	$5.319 \cdot 10^{-2}$	$7.387 \cdot 10^{-3}$
"	382.49	31.24	$6.424 \cdot 10^{-2}$	$9.451 \cdot 10^{-3}$
"	532.39	43.80	$7.568 \cdot 10^{-2}$	$1.140 \cdot 10^{-2}$
"	671.60	52.75	$8.196 \cdot 10^{-2}$	$1.306 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-7b

Isotermas de adsorción: Etileno ( $E^=$ )-Etano ( $E^-$ )

T=50°C

$V_{E^=} : V_{E^-}$	$P'_{E^=}$	$P'_{E^-}$	$n_{E^=}$	$n_{E^-}$
1:5	9.92	50.18	$2.688 \cdot 10^{-3}$	$1.916 \cdot 10^{-2}$
"	22.90	116.90	$4.158 \cdot 10^{-3}$	$2.992 \cdot 10^{-2}$
"	38.65	197.00	$5.417 \cdot 10^{-3}$	$3.935 \cdot 10^{-2}$
"	53.37	274.00	$6.413 \cdot 10^{-3}$	$4.703 \cdot 10^{-2}$
"	73.87	382.10	$7.473 \cdot 10^{-3}$	$5.533 \cdot 10^{-2}$
"	103.00	536.50	$8.723 \cdot 10^{-3}$	$6.458 \cdot 10^{-2}$
1:2	14.84	22.16	$5.325 \cdot 10^{-3}$	$1.126 \cdot 10^{-2}$
"	32.04	48.06	$7.868 \cdot 10^{-3}$	$1.664 \cdot 10^{-2}$
"	62.72	94.88	$1.140 \cdot 10^{-2}$	$2.421 \cdot 10^{-2}$
"	101.40	153.30	$1.469 \cdot 10^{-2}$	$3.151 \cdot 10^{-2}$
"	152.20	233.20	$1.831 \cdot 10^{-2}$	$3.928 \cdot 10^{-2}$
"	202.26	310.90	$2.101 \cdot 10^{-2}$	$4.506 \cdot 10^{-2}$
"	277.50	426.80	$2.402 \cdot 10^{-2}$	$5.199 \cdot 10^{-2}$
1:1	32.14	25.46	$9.336 \cdot 10^{-3}$	$1.136 \cdot 10^{-2}$
"	58.80	47.30	$1.272 \cdot 10^{-2}$	$1.560 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-7b (continuación)

$V_E = V_{E^-}$	$P_E'$	$P_{E^-}'$	$n_E'$	$n_{E^-}$
1:1	123.30	99.64	$1.912 \cdot 10^{-2}$	$2.347 \cdot 10^{-2}$
"	206.10	168.00	$2.515 \cdot 10^{-2}$	$3.098 \cdot 10^{-2}$
"	280.60	228.60	$2.927 \cdot 10^{-2}$	$3.620 \cdot 10^{-2}$
"	382.90	313.20	$3.354 \cdot 10^{-2}$	$4.184 \cdot 10^{-2}$
1.5:1	33.13	14.47	$1.078 \cdot 10^{-2}$	$7.339 \cdot 10^{-3}$
"	72.58	28.12	$1.519 \cdot 10^{-2}$	$1.039 \cdot 10^{-2}$
"	107.20	55.45	$2.093 \cdot 10^{-2}$	$1.431 \cdot 10^{-2}$
"	175.20	90.64	$2.763 \cdot 10^{-2}$	$1.897 \cdot 10^{-2}$
"	239.20	123.80	$3.244 \cdot 10^{-2}$	$2.235 \cdot 10^{-2}$
"	280.60	152.50	$3.749 \cdot 10^{-2}$	$2.583 \cdot 10^{-2}$
"	434.00	235.80	$4.355 \cdot 10^{-2}$	$3.026 \cdot 10^{-2}$
5:1	28.53	6.87	$1.049 \cdot 10^{-2}$	$3.782 \cdot 10^{-3}$
"	50.32	12.19	$1.490 \cdot 10^{-2}$	$5.400 \cdot 10^{-3}$
"	82.75	20.05	$1.989 \cdot 10^{-2}$	$7.230 \cdot 10^{-3}$
"	163.20	40.05	$2.915 \cdot 10^{-2}$	$1.062 \cdot 10^{-2}$
"	272.70	66.90	$3.860 \cdot 10^{-2}$	$1.421 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-7b (continuación)

$V_E = : V_{E^-}$	$P_E'$	$P_{E^-}'$	$n_E =$	$n_{E^-}$
5:1	377.70	93.26	$4.569 \cdot 10^{-2}$	$1.690 \cdot 10^{-2}$
"	556.80	138.30	$5.457 \cdot 10^{-2}$	$2.019 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-8a

Isotermas de adsorción: Etileno ( $E^{\equiv}$ )-Propileno ( $P^{\equiv}$ )

T=20°C

$V_E = V_P$	$P'_E$	$P'_P$	$n_E$	$n_P$
2:1	40.85	0.54	$1.727 \cdot 10^{-2}$	$1.062 \cdot 10^{-2}$
"	126.90	4.78	$2.995 \cdot 10^{-2}$	$2.083 \cdot 10^{-2}$
"	200.85	8.64	$3.674 \cdot 10^{-2}$	$2.753 \cdot 10^{-2}$
"	286.35	14.88	$4.238 \cdot 10^{-2}$	$3.400 \cdot 10^{-2}$
"	384.10	22.60	$4.679 \cdot 10^{-2}$	$4.032 \cdot 10^{-2}$
"	491.92	32.70	$5.020 \cdot 10^{-2}$	$4.640 \cdot 10^{-2}$
"	610.22	45.10	$5.256 \cdot 10^{-2}$	$5.255 \cdot 10^{-2}$
"	663.04	51.70	$5.438 \cdot 10^{-2}$	$5.515 \cdot 10^{-2}$
1:10	8.86	6.38	$2.660 \cdot 10^{-3}$	$3.482 \cdot 10^{-2}$
"	29.60	36.40	$4.133 \cdot 10^{-3}$	$6.726 \cdot 10^{-2}$
"	56.70	106.30	$4.972 \cdot 10^{-3}$	$9.572 \cdot 10^{-2}$
"	88.43	233.00	$5.348 \cdot 10^{-3}$	$1.185 \cdot 10^{-1}$
"	109.77	344.00	$5.224 \cdot 10^{-3}$	$1.286 \cdot 10^{-1}$
"	130.10	447.60	$4.942 \cdot 10^{-3}$	$1.361 \cdot 10^{-1}$
"	145.70	559.40	$5.132 \cdot 10^{-3}$	$1.426 \cdot 10^{-1}$

TABLA 5-8a (continuación)

$V_E = V_P =$	$P'_E =$	$P'_P =$	$n_E =$	$n_P =$
1:50	4.42	5.42	$1.286 \cdot 10^{-3}$	$3.472 \cdot 10^{-2}$
"	13.76	35.00	$2.081 \cdot 10^{-3}$	$6.701 \cdot 10^{-2}$
"	27.26	103.12	$2.456 \cdot 10^{-3}$	$9.545 \cdot 10^{-2}$
"	41.88	227.64	$2.711 \cdot 10^{-3}$	$1.182 \cdot 10^{-1}$
"	53.87	353.10	$2.786 \cdot 10^{-3}$	$1.303 \cdot 10^{-1}$
"	66.08	498.90	$2.835 \cdot 10^{-3}$	$1.404 \cdot 10^{-1}$
"	76.30	637.42	$2.895 \cdot 10^{-3}$	$1.477 \cdot 10^{-1}$
5:1	71.78	0.44	$2.855 \cdot 10^{-2}$	$7.099 \cdot 10^{-3}$
"	224.00	3.11	$4.904 \cdot 10^{-2}$	$1.397 \cdot 10^{-2}$
"	320.90	5.71	$5.720 \cdot 10^{-2}$	$1.728 \cdot 10^{-2}$
"	434.05	8.42	$6.372 \cdot 10^{-2}$	$2.057 \cdot 10^{-2}$
"	549.10	12.41	$7.006 \cdot 10^{-2}$	$2.374 \cdot 10^{-2}$
"	675.00	16.52	$7.534 \cdot 10^{-2}$	$2.689 \cdot 10^{-2}$
1:2	35.31	4.41	$1.075 \cdot 10^{-2}$	$2.810 \cdot 10^{-2}$
"	115.40	25.00	$1.703 \cdot 10^{-2}$	$5.459 \cdot 10^{-2}$
"	192.30	55.25	$2.006 \cdot 10^{-2}$	$7.298 \cdot 10^{-2}$



TABLA 5-8a (continuación)

$V_E = V_P =$	$P'_E =$	$P'_P =$	$n_E =$	$n_P =$
1:2	255.04	85.82	$2.091 \cdot 10^{-2}$	$8.417 \cdot 10^{-2}$
"	323.33	125.82	$2.121 \cdot 10^{-2}$	$9.441 \cdot 10^{-2}$
"	390.50	173.44	$2.162 \cdot 10^{-2}$	$1.039 \cdot 10^{-1}$
"	460.10	234.52	$2.179 \cdot 10^{-2}$	$1.120 \cdot 10^{-1}$
1:4	16.23	3.63	$5.518 \cdot 10^{-3}$	$2.824 \cdot 10^{-2}$
"	52.07	21.27	$9.065 \cdot 10^{-3}$	$5.498 \cdot 10^{-2}$
"	102.02	61.22	$1.121 \cdot 10^{-2}$	$7.946 \cdot 10^{-2}$
"	161.01	129.46	$1.243 \cdot 10^{-2}$	$1.011 \cdot 10^{-1}$
"	233.20	240.27	$1.233 \cdot 10^{-2}$	$1.185 \cdot 10^{-1}$
"	268.18	308.44	$1.239 \cdot 10^{-2}$	$1.259 \cdot 10^{-1}$
"	304.73	382.52	$1.229 \cdot 10^{-2}$	$1.327 \cdot 10^{-1}$

TABLA 5-8b

Isotermas de adsorción: Etileno ( $E^=$ )-Propileno ( $P^=$ )

T=50°C

$V_{E^=}:V_{P^=}$	$P_{E^=}^1$	$P_{P^=}^1$	$n_{E^=}$	$n_{P^=}$
1:10	7.73	9.26	$1.167 \cdot 10^{-3}$	$2.067 \cdot 10^{-2}$
"	18.17	26.60	$1.869 \cdot 10^{-3}$	$4.007 \cdot 10^{-2}$
"	28.02	55.82	$2.546 \cdot 10^{-3}$	$5.730 \cdot 10^{-2}$
"	39.48	101.70	$2.918 \cdot 10^{-3}$	$7.160 \cdot 10^{-2}$
"	56.71	159.60	$2.244 \cdot 10^{-3}$	$8.407 \cdot 10^{-2}$
"	70.84	217.64	$2.219 \cdot 10^{-3}$	$9.634 \cdot 10^{-2}$
"	92.76	368.96	$3.228 \cdot 10^{-3}$	$1.153 \cdot 10^{-1}$
"	106.47	466.11	$3.335 \cdot 10^{-3}$	$1.214 \cdot 10^{-1}$
"	113.14	511.20	$3.484 \cdot 10^{-3}$	$1.248 \cdot 10^{-1}$
1:3	18.92	3.48	$1.809 \cdot 10^{-2}$	$3.225 \cdot 10^{-3}$
"	43.95	21.91	$3.373 \cdot 10^{-2}$	$5.865 \cdot 10^{-3}$
"	75.45	45.61	$4.843 \cdot 10^{-2}$	$6.940 \cdot 10^{-3}$
"	107.39	79.38	$6.150 \cdot 10^{-2}$	$7.940 \cdot 10^{-3}$
"	141.30	124.76	$7.255 \cdot 10^{-2}$	$8.625 \cdot 10^{-3}$
"	170.89	168.17	$8.395 \cdot 10^{-2}$	$1.001 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-8b (continuación)

$V_E = V_P =$	$P'_E =$	$P'_P =$	$n_E =$	$n_P =$
1:3	200.78	221.85	$9.380 \cdot 10^{-2}$	$1.134 \cdot 10^{-2}$
"	273.45	340.74	$1.112 \cdot 10^{-1}$	$1.181 \cdot 10^{-2}$
1:2	31.40	8.35	$6.060 \cdot 10^{-3}$	$2.106 \cdot 10^{-2}$
"	79.58	29.93	$9.410 \cdot 10^{-3}$	$3.984 \cdot 10^{-2}$
"	133.67	62.37	$1.176 \cdot 10^{-2}$	$5.695 \cdot 10^{-2}$
"	189.26	112.11	$1.389 \cdot 10^{-2}$	$7.120 \cdot 10^{-2}$
"	237.62	167.77	$1.718 \cdot 10^{-2}$	$8.450 \cdot 10^{-2}$
"	297.25	218.32	$1.683 \cdot 10^{-2}$	$9.485 \cdot 10^{-2}$
"	345.81	277.30	$1.827 \cdot 10^{-2}$	$1.039 \cdot 10^{-1}$
1:1	38.92	3.36	$8.750 \cdot 10^{-3}$	$1.457 \cdot 10^{-2}$
"	106.70	16.14	$1.280 \cdot 10^{-2}$	$2.761 \cdot 10^{-2}$
"	173.87	34.43	$1.690 \cdot 10^{-2}$	$3.970 \cdot 10^{-2}$
"	253.25	56.89	$1.906 \cdot 10^{-2}$	$5.110 \cdot 10^{-2}$
"	328.45	86.59	$2.189 \cdot 10^{-2}$	$6.130 \cdot 10^{-2}$
"	405.73	123.74	$2.433 \cdot 10^{-2}$	$7.030 \cdot 10^{-2}$
"	489.76	160.01	$2.573 \cdot 10^{-2}$	$7.945 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-8b (continuación)

$V_E = V_P =$	$P'_E =$	$P'_P =$	$n_E =$	$n_P =$
2:1	33.44	0.73	$9.485 \cdot 10^{-3}$	$7.385 \cdot 10^{-3}$
"	87.09	4.51	$1.571 \cdot 10^{-2}$	$1.425 \cdot 10^{-2}$
"	180.39	14.96	$2.288 \cdot 10^{-2}$	$2.375 \cdot 10^{-2}$
"	266.57	26.18	$2.756 \cdot 10^{-2}$	$3.123 \cdot 10^{-2}$
"	351.73	38.08	$3.238 \cdot 10^{-2}$	$3.860 \cdot 10^{-2}$
"	462.18	55.74	$3.674 \cdot 10^{-2}$	$4.689 \cdot 10^{-2}$
"	577.09	74.83	$4.034 \cdot 10^{-2}$	$5.500 \cdot 10^{-2}$
3:1	43.22	1.03	$1.178 \cdot 10^{-2}$	$6.135 \cdot 10^{-3}$
"	111.93	3.52	$1.936 \cdot 10^{-2}$	$1.219 \cdot 10^{-2}$
"	188.08	9.50	$2.574 \cdot 10^{-2}$	$1.749 \cdot 10^{-2}$
"	276.24	16.98	$3.012 \cdot 10^{-2}$	$2.258 \cdot 10^{-2}$
"	363.76	24.01	$3.464 \cdot 10^{-2}$	$2.777 \cdot 10^{-2}$
"	450.63	32.78	$3.920 \cdot 10^{-2}$	$3.264 \cdot 10^{-2}$
"	541.29	41.11	$4.306 \cdot 10^{-2}$	$3.747 \cdot 10^{-2}$
"	604.38	46.76	$4.402 \cdot 10^{-2}$	$4.030 \cdot 10^{-2}$
6:1	50.28	0.62	$1.458 \cdot 10^{-2}$	$3.696 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-8b (continuación)

$V_E = : V_P =$	$P'_E =$	$P'_P =$	$n_E =$	$n_P =$
6:1	119.28	2.09	$2.232 \cdot 10^{-2}$	$7.290 \cdot 10^{-3}$
"	204.02	4.97	$3.121 \cdot 10^{-2}$	$1.063 \cdot 10^{-2}$
"	284.05	7.66	$3.712 \cdot 10^{-2}$	$1.340 \cdot 10^{-2}$
"	366.37	11.10	$4.264 \cdot 10^{-2}$	$1.604 \cdot 10^{-2}$
"	451.59	14.91	$4.765 \cdot 10^{-2}$	$1.862 \cdot 10^{-2}$
"	536.88	18.82	$5.260 \cdot 10^{-2}$	$2.121 \cdot 10^{-2}$
"	627.85	22.82	$5.670 \cdot 10^{-2}$	$2.376 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-9a

Isotermas de adsorción: Etano( $E^-$ )-Propileno( $P^-$ ) $T=20^{\circ}\text{C}$ 

$V_{E^-}:V_{P^-}$	$P_{E^-}$	$P_{P^-}$	$n_{E^-}$	$n_{P^-}$
5:1	15.24	—	$1.602 \cdot 10^{-2}$	$3.504 \cdot 10^{-3}$
"	50.95	0.33	$3.002 \cdot 10^{-2}$	$6.983 \cdot 10^{-3}$
"	103.02	1.59	$4.240 \cdot 10^{-2}$	$1.037 \cdot 10^{-2}$
"	171.88	3.52	$5.310 \cdot 10^{-2}$	$1.370 \cdot 10^{-2}$
"	253.69	5.97	$6.251 \cdot 10^{-2}$	$1.698 \cdot 10^{-2}$
"	345.57	9.39	$7.092 \cdot 10^{-2}$	$2.015 \cdot 10^{-2}$
"	457.06	13.76	$7.736 \cdot 10^{-2}$	$2.323 \cdot 10^{-2}$
"	569.76	19.11	$8.368 \cdot 10^{-2}$	$2.621 \cdot 10^{-2}$
"	706.62	25.23	$8.759 \cdot 10^{-2}$	$2.911 \cdot 10^{-2}$
1:2	15.05	1.30	$9.017 \cdot 10^{-3}$	$2.091 \cdot 10^{-2}$
"	50.86	11.95	$1.599 \cdot 10^{-2}$	$4.091 \cdot 10^{-2}$
"	84.63	24.45	$1.963 \cdot 10^{-2}$	$5.367 \cdot 10^{-2}$
"	127.28	42.56	$2.239 \cdot 10^{-2}$	$6.586 \cdot 10^{-2}$
"	175.76	68.68	$2.457 \cdot 10^{-2}$	$7.725 \cdot 10^{-2}$
"	239.49	103.26	$2.522 \cdot 10^{-2}$	$8.780 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-9a (continuación)

$V_{E^-}:V_{P^+}$	$P_{E^-}$	$P_{P^+}$	$n_{E^-}$	$n_{P^+}$
1:2	308.54	147.86	$2.535 \cdot 10^{-2}$	$9.737 \cdot 10^{-2}$
"	372.31	201.90	$2.599 \cdot 10^{-2}$	$1.060 \cdot 10^{-1}$
"	449.54	269.33	$2.528 \cdot 10^{-2}$	$1.133 \cdot 10^{-1}$
1:5	13.08	6.31	$5.735 \cdot 10^{-3}$	$3.451 \cdot 10^{-2}$
"	27.60	17.47	$7.797 \cdot 10^{-3}$	$5.097 \cdot 10^{-2}$
"	45.28	35.88	$9.546 \cdot 10^{-3}$	$6.669 \cdot 10^{-2}$
"	69.08	65.71	$1.068 \cdot 10^{-2}$	$8.136 \cdot 10^{-2}$
"	95.50	107.86	$1.156 \cdot 10^{-2}$	$9.471 \cdot 10^{-2}$
"	125.03	162.77	$1.213 \cdot 10^{-2}$	$1.068 \cdot 10^{-1}$
"	159.90	236.32	$1.216 \cdot 10^{-2}$	$1.170 \cdot 10^{-1}$
"	197.50	321.49	$1.193 \cdot 10^{-2}$	$1.261 \cdot 10^{-1}$
"	232.02	416.33	$1.200 \cdot 10^{-2}$	$1.342 \cdot 10^{-1}$
2:1	27.88	1.18	$1.842 \cdot 10^{-2}$	$1.048 \cdot 10^{-2}$
"	97.65	5.04	$3.265 \cdot 10^{-2}$	$2.070 \cdot 10^{-2}$
"	200.30	13.17	$4.365 \cdot 10^{-2}$	$3.048 \cdot 10^{-2}$
"	281.17	21.33	$4.969 \cdot 10^{-2}$	$3.674 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-9a (continuación)

$V_E^- : V_P^-$	$P_E^-$	$P_P^-$	$n_E^-$	$n_P^-$
2:1	378.06	32.18	$5.414 \cdot 10^{-2}$	$4.271 \cdot 10^{-2}$
"	484.23	45.76	$5.765 \cdot 10^{-2}$	$4.841 \cdot 10^{-2}$
"	602.05	62.08	$6.000 \cdot 10^{-2}$	$5.383 \cdot 10^{-2}$
"	647.14	70.09	$6.256 \cdot 10^{-2}$	$5.656 \cdot 10^{-2}$
1:10	6.62	6.10	$2.873 \cdot 10^{-3}$	$3.477 \cdot 10^{-2}$
"	22.87	35.43	$4.785 \cdot 10^{-3}$	$6.722 \cdot 10^{-2}$
"	47.01	104.30	$5.909 \cdot 10^{-3}$	$9.569 \cdot 10^{-2}$
"	79.00	230.59	$6.250 \cdot 10^{-3}$	$1.184 \cdot 10^{-1}$
"	97.55	324.59	$6.145 \cdot 10^{-3}$	$1.267 \cdot 10^{-1}$
"	115.36	423.91	$6.114 \cdot 10^{-3}$	$1.344 \cdot 10^{-1}$
"	139.63	573.25	$5.957 \cdot 10^{-3}$	$1.443 \cdot 10^{-1}$
1:50	2.24	4.98	$8.646 \cdot 10^{-4}$	$3.500 \cdot 10^{-2}$
"	7.81	33.77	$1.487 \cdot 10^{-3}$	$6.782 \cdot 10^{-2}$
"	16.12	101.56	$1.885 \cdot 10^{-3}$	$9.665 \cdot 10^{-2}$
"	25.80	226.34	$2.117 \cdot 10^{-3}$	$1.197 \cdot 10^{-1}$
"	33.92	354.49	$2.184 \cdot 10^{-3}$	$1.318 \cdot 10^{-1}$



TABLA 5-9a (continuación)

$V_E^- : V_P^=$	$P_E'$	$P_P^=$	$n_E^-$	$n_P^=$
1:50	41.94	506.82	$2.262 \cdot 10^{-3}$	$1.415 \cdot 10^{-1}$
"	50.28	648.99	$2.398 \cdot 10^{-3}$	$1.486 \cdot 10^{-1}$

TABLA 5-9b

Isotermas de adsorción: Etano ( $E^-$ )-Propileno ( $P^-$ ) $T=50^{\circ}\text{C}$ 

$V_{E^-}:V_{P^-}$	$P_{E^-}$	$P_{P^-}$	$n_{E^-}$	$n_{P^-}$
1:1	33.07	4.80	$9.750 \cdot 10^{-3}$	$1.440 \cdot 10^{-2}$
"	93.94	19.26	$1.694 \cdot 10^{-2}$	$2.914 \cdot 10^{-2}$
"	160.16	39.88	$2.132 \cdot 10^{-2}$	$4.099 \cdot 10^{-2}$
"	216.19	66.98	$2.545 \cdot 10^{-2}$	$4.984 \cdot 10^{-2}$
"	287.51	98.11	$2.706 \cdot 10^{-2}$	$5.800 \cdot 10^{-2}$
"	344.40	129.34	$2.912 \cdot 10^{-2}$	$6.400 \cdot 10^{-2}$
"	406.24	160.95	$3.041 \cdot 10^{-2}$	$7.045 \cdot 10^{-2}$
"	476.09	191.64	$3.036 \cdot 10^{-2}$	$7.680 \cdot 10^{-2}$
3:4	24.34	3.55	$7.405 \cdot 10^{-3}$	$1.462 \cdot 10^{-2}$
"	78.80	19.64	$1.281 \cdot 10^{-2}$	$3.095 \cdot 10^{-2}$
"	141.15	49.18	$1.694 \cdot 10^{-2}$	$4.507 \cdot 10^{-2}$
"	205.87	91.09	$2.065 \cdot 10^{-2}$	$5.720 \cdot 10^{-2}$
"	282.82	140.18	$2.234 \cdot 10^{-2}$	$6.805 \cdot 10^{-2}$
"	353.25	195.21	$2.513 \cdot 10^{-2}$	$7.794 \cdot 10^{-2}$
"	442.38	263.61	$2.489 \cdot 10^{-2}$	$8.560 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-9b (continuación)

$V_E^- : V_P^-$	$P_E^-$	$P_P^-$	$n_E^-$	$n_P^-$
2:1	40.41	1.91	$1.230 \cdot 10^{-2}$	$9.130 \cdot 10^{-3}$
"	123.48	10.37	$2.137 \cdot 10^{-2}$	$1.908 \cdot 10^{-2}$
"	215.60	23.75	$2.899 \cdot 10^{-2}$	$2.824 \cdot 10^{-2}$
"	325.54	42.27	$3.370 \cdot 10^{-2}$	$3.652 \cdot 10^{-2}$
"	443.44	67.26	$3.705 \cdot 10^{-2}$	$4.370 \cdot 10^{-2}$
"	532.59	85.61	$3.755 \cdot 10^{-2}$	$4.824 \cdot 10^{-2}$
"	604.03	101.00	$3.720 \cdot 10^{-2}$	$5.125 \cdot 10^{-2}$
1:6	8.84	6.71	$2.332 \cdot 10^{-3}$	$2.157 \cdot 10^{-2}$
"	30.24	44.24	$4.487 \cdot 10^{-3}$	$4.933 \cdot 10^{-2}$
"	65.24	150.11	$6.310 \cdot 10^{-3}$	$7.715 \cdot 10^{-2}$
"	95.01	270.44	$7.735 \cdot 10^{-3}$	$9.520 \cdot 10^{-2}$
"	119.77	364.53	$8.090 \cdot 10^{-3}$	$1.062 \cdot 10^{-1}$
"	140.27	455.87	$8.510 \cdot 10^{-3}$	$1.138 \cdot 10^{-1}$
"	149.03	502.61	$8.960 \cdot 10^{-3}$	$1.174 \cdot 10^{-1}$
1:3	31.36	17.00	$6.180 \cdot 10^{-3}$	$3.117 \cdot 10^{-2}$
"	81.47	72.83	$9.305 \cdot 10^{-3}$	$5.595 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-9b (continuación)

$V_E^- : V_P^-$	$P_E^-$	$P_P^-$	$n_E^-$	$n_P^-$
1:3	136.19	156.83	$1.168 \cdot 10^{-2}$	$7.610 \cdot 10^{-2}$
"	174.54	214.67	$1.296 \cdot 10^{-2}$	$8.930 \cdot 10^{-2}$
"	208.53	296.56	$1.492 \cdot 10^{-2}$	$9.850 \cdot 10^{-2}$
"	240.43	346.14	$1.348 \cdot 10^{-2}$	$1.017 \cdot 10^{-1}$
"	264.23	413.01	$1.461 \cdot 10^{-2}$	$1.059 \cdot 10^{-1}$
1:9	9.95	15.70	$2.123 \cdot 10^{-3}$	$3.140 \cdot 10^{-2}$
"	33.09	105.41	$4.077 \cdot 10^{-3}$	$6.960 \cdot 10^{-2}$
"	51.39	194.31	$4.871 \cdot 10^{-3}$	$8.905 \cdot 10^{-2}$
"	68.70	308.94	$5.820 \cdot 10^{-3}$	$1.044 \cdot 10^{-1}$
"	88.62	453.41	$6.335 \cdot 10^{-3}$	$1.148 \cdot 10^{-1}$
"	105.69	560.88	$6.545 \cdot 10^{-3}$	$1.237 \cdot 10^{-1}$
4:3	30.70	1.27	$1.012 \cdot 10^{-2}$	$1.117 \cdot 10^{-2}$
"	106.80	14.30	$2.038 \cdot 10^{-2}$	$2.609 \cdot 10^{-2}$
"	207.05	40.04	$2.672 \cdot 10^{-2}$	$3.893 \cdot 10^{-2}$
"	284.88	61.09	$2.914 \cdot 10^{-2}$	$4.682 \cdot 10^{-2}$
"	360.00	88.33	$3.198 \cdot 10^{-2}$	$5.370 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-9b (continuación).

$V_E^- : V_P^-$	$P_E^-$	$P_P^-$	$n_E^-$	$n_P^-$
4:3	441.31	118.75	$3.380 \cdot 10^{-2}$	$6.000 \cdot 10^{-2}$
"	512.05	139.78	$3.367 \cdot 10^{-2}$	$6.510 \cdot 10^{-2}$
8:1	63.14	1.40	$2.019 \cdot 10^{-2}$	$3.582 \cdot 10^{-3}$
"	167.50	3.57	$3.369 \cdot 10^{-2}$	$7.045 \cdot 10^{-3}$
"	287.65	7.18	$4.458 \cdot 10^{-2}$	$1.025 \cdot 10^{-2}$
"	407.24	10.87	$5.175 \cdot 10^{-2}$	$1.304 \cdot 10^{-2}$
"	532.59	15.01	$5.795 \cdot 10^{-2}$	$1.577 \cdot 10^{-2}$
"	660.04	19.92	$6.280 \cdot 10^{-2}$	$1.835 \cdot 10^{-2}$
1:2	27.79	8.55	$6.880 \cdot 10^{-3}$	$2.145 \cdot 10^{-2}$
"	104.85	61.00	$1.337 \cdot 10^{-2}$	$5.099 \cdot 10^{-2}$
"	179.81	134.95	$1.638 \cdot 10^{-2}$	$6.940 \cdot 10^{-2}$
"	247.18	199.27	$1.682 \cdot 10^{-2}$	$8.175 \cdot 10^{-2}$
"	292.56	269.29	$1.893 \cdot 10^{-2}$	$8.940 \cdot 10^{-2}$
"	345.25	337.03	$1.989 \cdot 10^{-2}$	$9.740 \cdot 10^{-2}$

### 5.1.3. MEZCLAS TERNARIAS

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 5-10a a 5-11b respectivamente.

TABLA 5-10a

Isotermas de adsorción: Etileno ( $E^+$ )-Etano ( $E^-$ )-Propileno ( $P^+$ )  $T=20^\circ C$ 

$V_E:V_{E^-}:V_{P^+}$	$P_E^+$	$P_{E^-}$	$P_{P^+}$	$n_E^+$	$n_{E^-}$	$n_{P^+}$
3:3:1	11.82	6.61	0.33	$9.020 \cdot 10^{-3}$	$9.548 \cdot 10^{-3}$	$3.361 \cdot 10^{-3}$
"	41.55	26.53	0.60	$1.625 \cdot 10^{-2}$	$1.780 \cdot 10^{-2}$	$6.729 \cdot 10^{-3}$
"	85.40	55.84	2.28	$2.203 \cdot 10^{-2}$	$2.507 \cdot 10^{-2}$	$9.961 \cdot 10^{-3}$
"	134.10	92.77	3.11	$2.730 \cdot 10^{-2}$	$3.155 \cdot 10^{-2}$	$1.327 \cdot 10^{-2}$
"	196.00	140.26	6.27	$3.122 \cdot 10^{-2}$	$3.695 \cdot 10^{-2}$	$1.635 \cdot 10^{-2}$
1:3:1	3.71	3.76	0.33	$3.058 \cdot 10^{-3}$	$9.848 \cdot 10^{-3}$	$3.362 \cdot 10^{-3}$
"	9.92	23.78	0.41	$5.868 \cdot 10^{-3}$	$1.801 \cdot 10^{-2}$	$6.760 \cdot 10^{-3}$
"	23.45	49.15	0.68	$8.276 \cdot 10^{-3}$	$2.567 \cdot 10^{-2}$	$1.012 \cdot 10^{-2}$
"	39.06	80.80	2.83	$1.016 \cdot 10^{-2}$	$3.269 \cdot 10^{-2}$	$1.334 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-10a (continuación)

$V_E^-:V_E^-:V_P^-$	$P_E^-$	$P_{E^-}$	$P_P^-$	$n_E^-$	$n_{E^-}$	$n_P^-$
1:3:1	58.29	117.79	4.84	$1.162 \cdot 10^{-2}$	$3.914 \cdot 10^{-2}$	$1.658 \cdot 10^{-2}$
"	78.77	170.45	6.95	$1.294 \cdot 10^{-2}$	$4.402 \cdot 10^{-2}$	$1.974 \cdot 10^{-2}$
3:1:1	9.26	2.15	0.28	$9.249 \cdot 10^{-3}$	$3.176 \cdot 10^{-3}$	$3.355 \cdot 10^{-3}$
"	31.73	6.85	0.37	$1.714 \cdot 10^{-2}$	$6.092 \cdot 10^{-3}$	$6.723 \cdot 10^{-3}$
"	62.29	13.47	1.10	$2.311 \cdot 10^{-2}$	$8.480 \cdot 10^{-3}$	$9.736 \cdot 10^{-3}$
"	109.04	23.62	2.70	$2.962 \cdot 10^{-2}$	$1.116 \cdot 10^{-2}$	$1.324 \cdot 10^{-2}$
"	157.56	36.33	4.29	$3.482 \cdot 10^{-2}$	$1.325 \cdot 10^{-2}$	$1.645 \cdot 10^{-2}$
"	214.00	49.49	6.27	$3.923 \cdot 10^{-2}$	$1.529 \cdot 10^{-2}$	$1.962 \cdot 10^{-2}$
1:1:1	2.84	1.89	0.28	$3.101 \cdot 10^{-3}$	$3.194 \cdot 10^{-3}$	$3.346 \cdot 10^{-3}$
"	4.14	3.50	0.49	$5.964 \cdot 10^{-3}$	$6.190 \cdot 10^{-3}$	$6.698 \cdot 10^{-3}$



TABLA 5-10a (continuación)

$V_E = V_{E^-} : V_{P^-}$	$P_E =$	$P_{E^-}$	$P_{P^-}$	$n_E =$	$n_{E^-}$	$n_{P^-}$
1:1:1	26.51	18.75	1.53	$1.084 \cdot 10^{-2}$	$1.163 \cdot 10^{-2}$	$1.337 \cdot 10^{-2}$
"	59.10	38.78	4.47	$1.429 \cdot 10^{-2}$	$1.637 \cdot 10^{-2}$	$1.985 \cdot 10^{-2}$
"	94.91	65.82	7.63	$1.741 \cdot 10^{-2}$	$2.037 \cdot 10^{-2}$	$2.629 \cdot 10^{-2}$
"	134.81	100.78	15.47	$2.012 \cdot 10^{-2}$	$2.358 \cdot 10^{-2}$	$3.225 \cdot 10^{-2}$
1:2:1	3.32	4.56	0.28	$3.078 \cdot 10^{-3}$	$6.367 \cdot 10^{-3}$	$3.378 \cdot 10^{-3}$
"	9.10	13.57	0.37	$5.902 \cdot 10^{-3}$	$1.226 \cdot 10^{-2}$	$6.776 \cdot 10^{-3}$
"	19.14	30.95	1.19	$8.287 \cdot 10^{-3}$	$1.730 \cdot 10^{-2}$	$1.012 \cdot 10^{-2}$
"	34.14	51.30	2.32	$1.018 \cdot 10^{-2}$	$2.204 \cdot 10^{-2}$	$1.342 \cdot 10^{-2}$
"	68.43	101.67	5.93	$1.351 \cdot 10^{-2}$	$3.056 \cdot 10^{-2}$	$1.985 \cdot 10^{-2}$
"	110.29	176.30	10.89	$1.609 \cdot 10^{-2}$	$3.661 \cdot 10^{-2}$	$2.615 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-10a (continuación)

$V_E = V_E^- : V_P =$	$P_E^-$	$P_E^-$	$P_P^-$	$n_E^-$	$n_E^-$	$n_P^-$
2:1:1	7.00	2.42	0.28	$6.089 \cdot 10^{-3}$	$3.150 \cdot 10^{-3}$	$3.367 \cdot 10^{-3}$
"	19.51	5.25	0.66	$1.162 \cdot 10^{-2}$	$6.257 \cdot 10^{-3}$	$6.723 \cdot 10^{-3}$
"	41.68	13.64	1.01	$1.616 \cdot 10^{-2}$	$8.794 \cdot 10^{-3}$	$1.008 \cdot 10^{-2}$
"	69.72	23.53	2.30	$2.010 \cdot 10^{-2}$	$1.118 \cdot 10^{-2}$	$1.332 \cdot 10^{-2}$
"	135.88	49.94	5.60	$2.694 \cdot 10^{-2}$	$1.529 \cdot 10^{-2}$	$1.976 \cdot 10^{-2}$
"	219.00	81.43	10.93	$3.205 \cdot 10^{-2}$	$1.885 \cdot 10^{-2}$	$2.598 \cdot 10^{-2}$
4:1:1	15.05	2.59	0.31	$1.214 \cdot 10^{-2}$	$3.148 \cdot 10^{-3}$	$3.371 \cdot 10^{-3}$
"	51.90	6.97	0.61	$2.208 \cdot 10^{-2}$	$6.114 \cdot 10^{-3}$	$6.751 \cdot 10^{-3}$
"	102.38	16.73	1.44	$3.064 \cdot 10^{-2}$	$8.531 \cdot 10^{-3}$	$1.007 \cdot 10^{-2}$
"	165.03	29.07	2.90	$3.793 \cdot 10^{-2}$	$1.069 \cdot 10^{-2}$	$1.333 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-10a (continuación)

$V_E = V_E^- : V_P =$	$P_E =$	$P_E^-$	$P_P =$	$n_E =$	$n_E^-$	$n_P =$
4:1:1	244.30	42.68	5.38	$4.352 \cdot 10^{-2}$	$1.271 \cdot 10^{-2}$	$1.649 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-10b

Isotermas de adsorción: Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ )-Propileno ( $P^-$ )  $T=50^\circ C$ 

$V_E:V_{E^-}:V_{P^-}$	$P_E$	$P_{E^-}$	$P_{P^-}$	$n_E$	$n_{E^-}$	$n_{P^-}$
3:3:1	29,32	19.86	0.75	$7.274 \cdot 10^{-3}$	$8.244 \cdot 10^{-3}$	$3.248 \cdot 10^{-3}$
"	76.85	56.26	2.99	$1.271 \cdot 10^{-2}$	$1.480 \cdot 10^{-2}$	$6.508 \cdot 10^{-3}$
"	136.24	98.16	6.30	$1.692 \cdot 10^{-2}$	$2.079 \cdot 10^{-2}$	$9.590 \cdot 10^{-3}$
"	204.02	163.82	9.70	$2.030 \cdot 10^{-2}$	$2.436 \cdot 10^{-2}$	$1.265 \cdot 10^{-2}$
"	268.19	221.96	16.00	$2.404 \cdot 10^{-2}$	$2.872 \cdot 10^{-2}$	$1.542 \cdot 10^{-2}$
1:3:1	8.98	18.31	1.11	$2.624 \cdot 10^{-3}$	$8.473 \cdot 10^{-3}$	$3.222 \cdot 10^{-3}$
"	23.96	53.42	1.50	$4.731 \cdot 10^{-3}$	$1.517 \cdot 10^{-2}$	$6.499 \cdot 10^{-3}$
"	38.17	93.64	3.52	$6.376 \cdot 10^{-3}$	$2.135 \cdot 10^{-2}$	$9.507 \cdot 10^{-3}$
"	58.91	147.61	7.82	$7.722 \cdot 10^{-3}$	$2.613 \cdot 10^{-2}$	$1.290 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-10b (continuación)

$V_E^-:V_P^-$	$P_E^-$	$P_E^-$	$P_P^-$	$n_E^-$	$n_E^-$	$n_P^-$
1:3:1	78.62	197.33	11.88	$9.141 \cdot 10^{-3}$	$3.133 \cdot 10^{-2}$	$1.590 \cdot 10^{-2}$
"	106.07	275.58	15.30	$9.765 \cdot 10^{-3}$	$3.364 \cdot 10^{-2}$	$1.898 \cdot 10^{-2}$
3:1:1	28.13	6.75	0.59	$7.395 \cdot 10^{-3}$	$2.733 \cdot 10^{-3}$	$3.185 \cdot 10^{-3}$
"	67.09	17.02	1.62	$1.368 \cdot 10^{-2}$	$5.112 \cdot 10^{-3}$	$6.565 \cdot 10^{-3}$
"	119.47	30.78	4.93	$1.860 \cdot 10^{-2}$	$7.126 \cdot 10^{-3}$	$9.638 \cdot 10^{-3}$
"	172.23	45.09	8.82	$2.348 \cdot 10^{-2}$	$9.094 \cdot 10^{-3}$	$1.275 \cdot 10^{-2}$
"	224.26	62.40	11.72	$2.843 \cdot 10^{-2}$	$1.075 \cdot 10^{-2}$	$1.587 \cdot 10^{-2}$
"	281.43	82.28	14.86	$3.286 \cdot 10^{-2}$	$1.214 \cdot 10^{-2}$	$1.896 \cdot 10^{-2}$
2:1:1	39.97	15.81	1.22	$9.674 \cdot 10^{-3}$	$5.218 \cdot 10^{-3}$	$6.417 \cdot 10^{-3}$
"	75.53	29.39	2.47	$1.292 \cdot 10^{-2}$	$7.237 \cdot 10^{-3}$	$9.701 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-10b (continuación)

$V_E:V_{E^-}:V_{P^-}$	$P_E^-$	$P_{E^-}$	$P_{P^-}$	$n_E^-$	$n_{E^-}$	$n_{P^-}$
2:1:1	110.43	43.77	6.78	$1.622 \cdot 10^{-2}$	$9.187 \cdot 10^{-3}$	$1.273 \cdot 10^{-2}$
"	152.04	59.99	10.01	$1.884 \cdot 10^{-2}$	$1.094 \cdot 10^{-2}$	$1.602 \cdot 10^{-2}$
"	199.13	78.78	13.17	$2.091 \cdot 10^{-2}$	$1.244 \cdot 10^{-2}$	$1.910 \cdot 10^{-2}$
1:1:1	7.16	5.73	1.64	$2.696 \cdot 10^{-3}$	$2.841 \cdot 10^{-3}$	$3.237 \cdot 10^{-3}$
"	16.88	13.39	2.36	$5.130 \cdot 10^{-3}$	$5.477 \cdot 10^{-3}$	$6.592 \cdot 10^{-3}$
"	32.85	27.30	3.00	$7.251 \cdot 10^{-3}$	$7.479 \cdot 10^{-3}$	$9.844 \cdot 10^{-3}$
"	50.48	39.06	4.53	$8.577 \cdot 10^{-3}$	$9.706 \cdot 10^{-3}$	$1.301 \cdot 10^{-2}$
"	91.10	71.16	14.10	$1.129 \cdot 10^{-2}$	$1.330 \cdot 10^{-2}$	$1.910 \cdot 10^{-2}$
"	136.24	101.77	17.00	$1.355 \cdot 10^{-2}$	$1.704 \cdot 10^{-2}$	$2.566 \cdot 10^{-2}$
1:2:1	7.87	11.74	0.81	$2.623 \cdot 10^{-3}$	$5.655 \cdot 10^{-3}$	$3.256 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-10b (continuación)

$V_E^-:V_E^-:V_P^-$	$P_{E^-}$	$P_{E^-}$	$P_{P^-}$	$n_{E^-}$	$n_{E^-}$	$n_{P^-}$
1:2:1	19.98	31.61	1.16	4.815 $10^{-3}$	1.048 $10^{-2}$	6.597 $10^{-3}$
"	37.09	58.39	2.33	6.496 $10^{-3}$	1.460 $10^{-2}$	9.774 $10^{-3}$
"	56.84	101.59	5.28	7.911 $10^{-3}$	1.706 $10^{-2}$	1.293 $10^{-2}$
"	77.96	141.93	10.80	9.188 $10^{-3}$	1.980 $10^{-2}$	1.589 $10^{-2}$
"	97.84	186.75	14.38	1.059 $10^{-2}$	2.208 $10^{-2}$	1.905 $10^{-2}$
4:1:1	61.65	11.60	0.44	1.429 $10^{-2}$	3.943 $10^{-3}$	4.872 $10^{-3}$
"	94.10	18.01	1.85	1.769 $10^{-2}$	4.983 $10^{-3}$	6.517 $10^{-3}$
"	169.87	32.66	5.40	2.361 $10^{-2}$	6.895 $10^{-3}$	9.661 $10^{-3}$
"	251.36	49.69	8.46	2.895 $10^{-2}$	8.576 $10^{-3}$	1.275 $10^{-2}$
"	336.93	65.61	12.53	3.388 $10^{-2}$	1.036 $10^{-2}$	1.575 $10^{-2}$

TABLA 5-10b (continuación)

$V_E = V_E^- : V_P =$	$P_E =$	$P_E^-$	$P_P =$	$n_E =$	$n_E^-$	$n_P =$
4:1:1	430.96	81.61	15.10	$3.797 \cdot 10^{-2}$	$1.214 \cdot 10^{-2}$	$1.890 \cdot 10^{-2}$



TABLA 5-11a

Isotermas de adsorción: Metano ( $M^-$ )-Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ )  $T=20^\circ\text{C}$ 

$V_{M^-}:V_{E^-}=V_{E^-}$	$P_{M^-}$	$P_{E^-}$	$P_{E^-}$	$n_{M^-}$	$n_{E^-}$	$n_{E^-}$
1:1:1	14.04	2.01	0.52	$2.031 \cdot 10^{-3}$	$3.354 \cdot 10^{-3}$	$3.407 \cdot 10^{-3}$
"	36.93	4.57	1.89	$3.155 \cdot 10^{-3}$	$6.642 \cdot 10^{-3}$	$6.711 \cdot 10^{-3}$
"	58.49	9.40	5.25	$3.808 \cdot 10^{-3}$	$9.806 \cdot 10^{-3}$	$9.937 \cdot 10^{-3}$
"	95.17	16.28	7.66	$4.143 \cdot 10^{-3}$	$1.309 \cdot 10^{-2}$	$1.302 \cdot 10^{-2}$
"	128.16	21.04	12.37	$4.243 \cdot 10^{-3}$	$1.542 \cdot 10^{-2}$	$1.599 \cdot 10^{-2}$
"	162.21	29.67	18.53	$4.227 \cdot 10^{-3}$	$1.788 \cdot 10^{-2}$	$1.881 \cdot 10^{-2}$
3:1:1	57.10	1.21	0.48	$4.506 \cdot 10^{-3}$	$3.323 \cdot 10^{-3}$	$3.387 \cdot 10^{-3}$
"	145.08	4.98	2.92	$5.878 \cdot 10^{-3}$	$6.570 \cdot 10^{-3}$	$6.657 \cdot 10^{-3}$
"	245.37	6.56	4.64	$6.001 \cdot 10^{-3}$	$9.655 \cdot 10^{-3}$	$9.839 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-11a (continuación)

$V_M^-:V_E^-:V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$	$n_E^-$
3:1:1	352.22	12.52	8.58	$6.058 \cdot 10^{-3}$	$1.248 \cdot 10^{-2}$	$1.288 \cdot 10^{-2}$
"	447.58	20.21	13.27	$6.050 \cdot 10^{-3}$	$1.513 \cdot 10^{-2}$	$1.583 \cdot 10^{-2}$
3:1:2	60.47	1.28	1.62	$4.214 \cdot 10^{-3}$	$3.325 \cdot 10^{-3}$	$6.750 \cdot 10^{-3}$
"	155.27	5.53	6.41	$4.935 \cdot 10^{-3}$	$6.549 \cdot 10^{-3}$	$1.318 \cdot 10^{-2}$
"	258.86	9.11	14.85	$4.763 \cdot 10^{-3}$	$9.437 \cdot 10^{-3}$	$1.924 \cdot 10^{-2}$
"	363.39	17.83	27.78	$4.476 \cdot 10^{-3}$	$1.200 \cdot 10^{-2}$	$2.482 \cdot 10^{-2}$
"	465.73	28.08	42.99	$4.411 \cdot 10^{-3}$	$1.441 \cdot 10^{-2}$	$3.017 \cdot 10^{-2}$
3:2:1	61.98	2.48	0.70	$4.071 \cdot 10^{-3}$	$6.645 \cdot 10^{-3}$	$3.377 \cdot 10^{-3}$
"	154.00	10.85	3.78	$5.084 \cdot 10^{-3}$	$1.288 \cdot 10^{-2}$	$6.609 \cdot 10^{-3}$
"	260.14	22.93	6.67	$5.154 \cdot 10^{-3}$	$1.907 \cdot 10^{-2}$	$9.031 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-11a (continuación)

$V_M^-:V_E^-:V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$P_E^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$	$n_E^-$
3:2:1	367.54	40.66	11.54	5.080 10 <sup>-3</sup>	2.341 10 <sup>-2</sup>	1.251 10 <sup>-2</sup>	
"	465.73	62.22	18.26	5.050 10 <sup>-3</sup>	2.810 10 <sup>-2</sup>	1.497 10 <sup>-2</sup>	
"	587.69	88.20	27.10	5.036 10 <sup>-3</sup>	3.233 10 <sup>-2</sup>	1.791 10 <sup>-2</sup>	
1:2:1	13.28	2.32	0.71	2.090 10 <sup>-3</sup>	6.657 10 <sup>-3</sup>	3.367 10 <sup>-3</sup>	
"	63.48	22.51	6.49	3.459 10 <sup>-3</sup>	1.857 10 <sup>-2</sup>	9.736 10 <sup>-3</sup>	
"	97.86	37.20	10.20	3.617 10 <sup>-3</sup>	2.370 10 <sup>-2</sup>	1.271 10 <sup>-2</sup>	
"	130.93	59.59	17.21	3.894 10 <sup>-3</sup>	2.828 10 <sup>-2</sup>	1.542 10 <sup>-2</sup>	
"	164.89	84.55	24.65	3.878 10 <sup>-3</sup>	3.266 10 <sup>-2</sup>	1.810 10 <sup>-2</sup>	
"	198.98	111.12	35.37	3.858 10 <sup>-3</sup>	3.683 10 <sup>-2</sup>	2.044 10 <sup>-2</sup>	
1:1:2	13.64	1.29	2.49	2.002 10 <sup>-3</sup>	3.251 10 <sup>-3</sup>	6.531 10 <sup>-3</sup>	

TABLA 5-11a (continuación)

$V_M^-:V_E^-=:V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$	$\dot{n}_E^-$
1:1:2	37.46	5.38	$2.973 \cdot 10^{-3}$	$6.428 \cdot 10^{-3}$	$1.296 \cdot 10^{-2}$
"	66.89	12.40	$3.380 \cdot 10^{-3}$	$9.326 \cdot 10^{-3}$	$1.884 \cdot 10^{-2}$
"	98.03	18.11	$3.610 \cdot 10^{-3}$	$1.189 \cdot 10^{-2}$	$2.445 \cdot 10^{-2}$
"	130.37	28.72	$3.727 \cdot 10^{-3}$	$1.420 \cdot 10^{-2}$	$2.966 \cdot 10^{-2}$
"	166.30	40.36	$3.471 \cdot 10^{-3}$	$1.640 \cdot 10^{-2}$	$3.440 \cdot 10^{-2}$
1:2:2	14.69	2.91	$1.887 \cdot 10^{-3}$	$6.459 \cdot 10^{-3}$	$6.585 \cdot 10^{-3}$
"	38.94	13.41	$2.806 \cdot 10^{-3}$	$1.240 \cdot 10^{-2}$	$1.279 \cdot 10^{-2}$
"	70.08	27.26	$3.033 \cdot 10^{-3}$	$1.747 \cdot 10^{-3}$	$1.853 \cdot 10^{-2}$
"	101.18	49.79	$3.249 \cdot 10^{-3}$	$2.192 \cdot 10^{-2}$	$2.364 \cdot 10^{-2}$
"	136.17	78.21	$3.088 \cdot 10^{-3}$	$2.579 \cdot 10^{-2}$	$2.844 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-11a (continuación)

$V_M^-:V_E^-:V_E^-$	$P_M^-$	$P_E^-$	$P_E^-$	$n_M^-$	$n_E^-$	$n_E^-$
1:2:2	170.28	107.48	77.00	$3.006 \cdot 10^{-3}$	$2.955 \cdot 10^{-2}$	$3.274 \cdot 10^{-2}$

TABLA 5-11b

Isotermas de adsorción: Metano ( $M^-$ )-Etileno ( $E^-$ )-Etano ( $E^-$ )							T=50°C	
$V_{M^-}:V_{E^-}=V_{E^-}$	$P_{M^-}$	$P_{E^-}$	$P_{E^-}$	$n_{M^-}$	$n_{E^-}$	$n_{E^-}$		
3:1:1	70.28	3.95	2.18	$3.011 \cdot 10^{-3}$	$3.077 \cdot 10^{-3}$	$3.166 \cdot 10^{-3}$		
"	168.91	8.60	6.55	$6.156 \cdot 10^{-3}$	$5.883 \cdot 10^{-3}$	$6.109 \cdot 10^{-3}$		
"	267.84	18.89	13.60	$9.399 \cdot 10^{-3}$	$8.217 \cdot 10^{-3}$	$8.768 \cdot 10^{-3}$		
"	369.92	31.88	21.08	$1.243 \cdot 10^{-2}$	$1.028 \cdot 10^{-2}$	$1.139 \cdot 10^{-2}$		
"	476.70	46.42	31.53	$1.476 \cdot 10^{-2}$	$1.218 \cdot 10^{-2}$	$1.372 \cdot 10^{-2}$		
"	580.80	61.85	43.45	$1.667 \cdot 10^{-2}$	$1.399 \cdot 10^{-2}$	$1.590 \cdot 10^{-2}$		
3:1:2	63.08	5.16	6.75	$1.709 \cdot 10^{-3}$	$2.474 \cdot 10^{-3}$	$4.717 \cdot 10^{-3}$		
"	80.14	6.88	8.92	$2.066 \cdot 10^{-3}$	$2.986 \cdot 10^{-3}$	$5.688 \cdot 10^{-3}$		
"	179.03	12.97	26.55	$4.275 \cdot 10^{-3}$	$5.490 \cdot 10^{-3}$	$1.087 \cdot 10^{-2}$		

TABLA 5-11b (continuación)

$V_{M^-}:V_E=:V_{E^-}$	$P_{M^-}$	$P_{E^-}$	$P_{E^+}$	$n_{M^-}$	$n_{E^+}$	$n_{E^-}$
3:1:2	277.03	27.06	51.75	$6.697 \cdot 10^{-3}$	$7.463 \cdot 10^{-3}$	$1.511 \cdot 10^{-2}$
"	378.10	42.64	82.83	$8.879 \cdot 10^{-3}$	$9.220 \cdot 10^{-3}$	$1.862 \cdot 10^{-2}$
3:2:1	61.13	11.32	2.55	$1.792 \cdot 10^{-3}$	$4.730 \cdot 10^{-3}$	$2.574 \cdot 10^{-3}$
"	78.89	13.49	3.21	$2.125 \cdot 10^{-3}$	$5.612 \cdot 10^{-3}$	$3.057 \cdot 10^{-3}$
"	178.49	28.12	9.56	$4.263 \cdot 10^{-3}$	$1.066 \cdot 10^{-2}$	$5.788 \cdot 10^{-3}$
"	278.03	57.94	19.38	$6.421 \cdot 10^{-3}$	$1.440 \cdot 10^{-2}$	$8.168 \cdot 10^{-3}$
"	377.02	90.47	33.16	$8.682 \cdot 10^{-3}$	$1.786 \cdot 10^{-2}$	$1.015 \cdot 10^{-2}$
"	480.02	127.42	45.26	$1.063 \cdot 10^{-2}$	$2.088 \cdot 10^{-2}$	$1.230 \cdot 10^{-2}$
1:2:1	17.90	7.35	2.61	$1.568 \cdot 10^{-3}$	$6.012 \cdot 10^{-3}$	$3.119 \cdot 10^{-3}$
"	47.65	19.90	7.05	$2.453 \cdot 10^{-3}$	$1.101 \cdot 10^{-2}$	$5.853 \cdot 10^{-3}$

TABLA 5-11b (continuación)

$V_{M^-}:V_E=:V_{E^-}$	$P_{M^-}$	$P_{E^-}$	$P_E$	$n_{M^-}$	$n_{E^-}$	$n_E$
1:2:1	76.80	49.21	15.68	$2.335 \cdot 10^{-3}$	$1.525 \cdot 10^{-2}$	$8.536 \cdot 10^{-3}$
"	106.78	80.93	27.10	$2.661 \cdot 10^{-3}$	$1.878 \cdot 10^{-2}$	$1.075 \cdot 10^{-2}$
"	146.68	114.84	39.65	$2.981 \cdot 10^{-3}$	$2.208 \cdot 10^{-2}$	$1.284 \cdot 10^{-2}$
"	166.30	158.93	67.47	$3.369 \cdot 10^{-3}$	$2.436 \cdot 10^{-2}$	$1.340 \cdot 10^{-2}$
1:2:2	18.61	8.06	7.62	$1.482 \cdot 10^{-3}$	$5.903 \cdot 10^{-3}$	$5.963 \cdot 10^{-3}$
"	57.38	23.34	16.54	$1.967 \cdot 10^{-3}$	$1.051 \cdot 10^{-2}$	$1.140 \cdot 10^{-2}$
"	80.79	57.97	42.96	$1.940 \cdot 10^{-3}$	$1.436 \cdot 10^{-2}$	$1.593 \cdot 10^{-2}$
"	117.74	91.89	73.27	$1.579 \cdot 10^{-3}$	$1.767 \cdot 10^{-2}$	$1.960 \cdot 10^{-2}$
"	152.39	132.58	101.56	$1.442 \cdot 10^{-3}$	$2.030 \cdot 10^{-2}$	$2.348 \cdot 10^{-2}$
"	188.83	178.89	133.46	$1.123 \cdot 10^{-3}$	$2.236 \cdot 10^{-3}$	$2.699 \cdot 10^{-2}$



## 6. DISCUSION DE RESULTADOS

### 6.1. ISOTERMAS DE ADSORCION DE COMPUESTOS PUROS

#### 6.1.1. Influencia de las variables: presión, temperatura y cantidad de diluyente

En las figuras 6-1 y 6-2 se representan los datos de equilibrio correspondientes a los compuestos puros: metano, etileno, etano y propileno, que figuran en las tablas 5.1 a 5.4. Las isothermas resultantes pertenecen al grupo I de la clasificación de Brunauer (45), caracterizados por la ausencia de irregularidades tales como escalones, puntos de inflexión, etc., típicos de los fenómenos de adsorción de naturaleza física.

La concavidad de las isothermas hacia el eje de abscisas evidencia la progresiva disminución de la capacidad de adsorción del adsorbente (cantidad adsorbida por unidad de superficie) al aumentar la presión del mismo en la fase gaseosa. La capacidad de adsorción relativa entre los compuestos se mantiene prácticamente constante en el intervalo de presiones estudiado, no presentándose nunca cruces de las isothermas.

Las temperaturas de equilibrio investigadas fueron 20°C y 50°C. En el caso del etileno se investigó también la de 0°C para poder estudiar en un intervalo más amplio la variación de la capacidad de adsorción con la temperatura. A tal efecto en la figura 6-3 se representa la variación de la presión de equilibrio que corresponde a diferentes y determinadas cantidades adsorbidas de etileno frente a la inversa de las tres temperaturas citadas en coordenadas semilogarítmicas, puede apreciarse que se cumple la linealidad puesta de manifiesto por Lewis (46) para la adsorción física de hidrocarburos ligeros.

Asi mismo de las figuras 6-1 y 6-2 se deduce que en los intervalos de presiones y temperaturas investigados, existe una correlación entre el número de átomos de carbono de las moléculas del adsorbato y su grado de saturación, y su capacidad de adsorción, de tal modo que esta última crece con el número de átomos de carbono y a igualdad de estos lo hace con el grado de saturación.

Comprobada la no adsorción del gas utilizado como diluyente, helio, por el adsorbente carbón activo AC-40 en las condiciones de presión y temperatura estudiadas, se investigó la adsorción de metano a 20°C con diferentes cantidades de diluyente, figura 6-4, poniendose de manifiesto, como era de esperar, la nula influencia de éstas en la adsorción de las moléculas del hidrocarburo.

#### 6.1.2. Cálculo de la presión superficial de los compuestos puros

A partir de los datos experimentales de las tablas 5-1 a 5-4 correspondientes a las isotermas de adsorción de los compuestos puros a 20°C y 50°C y mediante la integración gráfica del segundo miembro de la ecuación [2-9] para cada serie de valores  $N_t$  frente a  $P$ , se calcularon los valores de las presiones superficiales de dichos compuestos puros del modo indicado en el apéndice 9.2.5.

En las tablas 6-1 a 6-4 se presentan los resultados obtenidos para dichos compuestos en función de su presión en el gas y en las figuras 6-5 y 6-6 se representan las presiones superficiales calculadas frente a las presiones en la fase gaseosa para las dos temperaturas estudiadas.

Las consideraciones del apartado anterior referentes a las isotermas de adsorción de los componentes puros, pueden extenderse punto por punto a las curvas obtenidas.

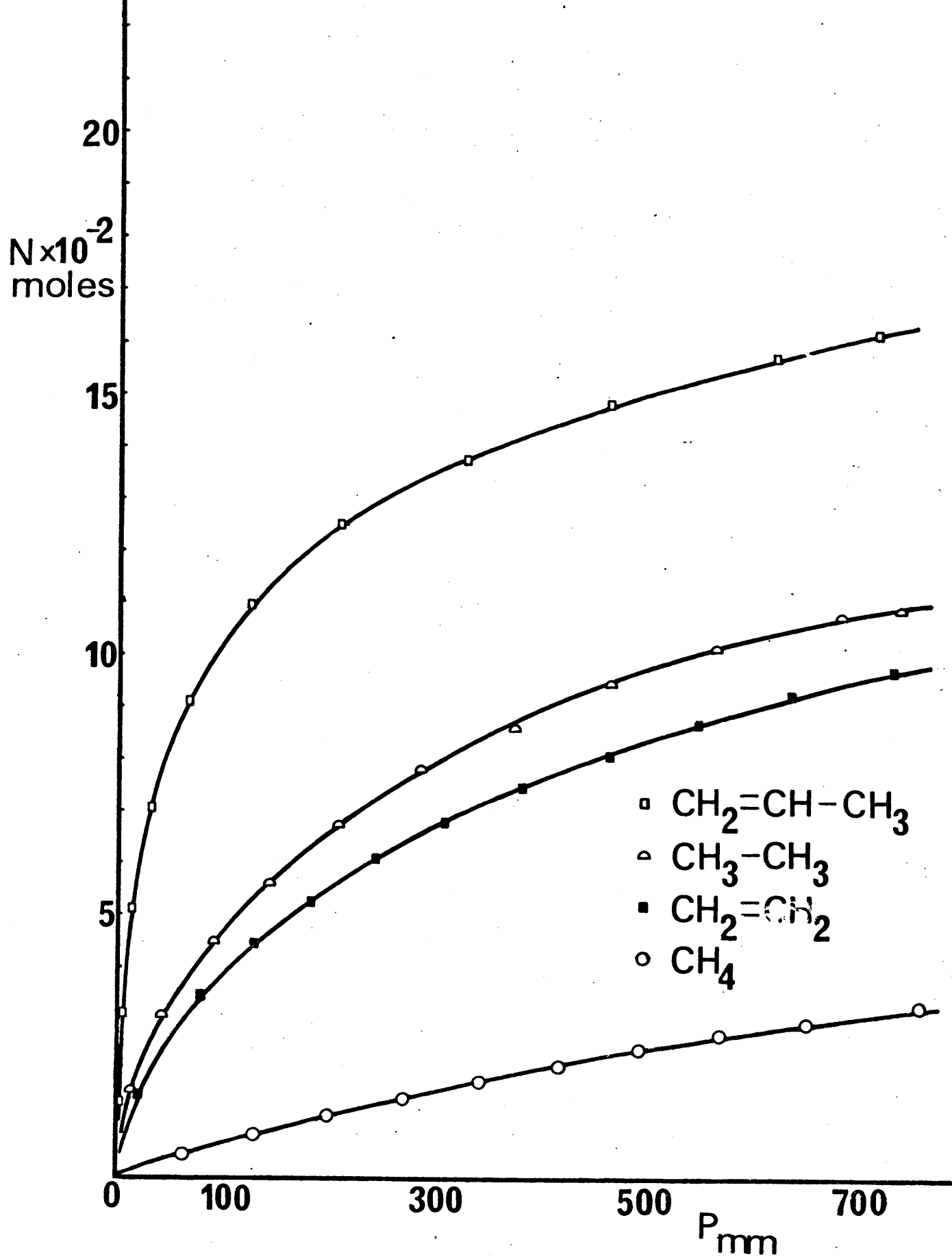


FIGURA 6-1

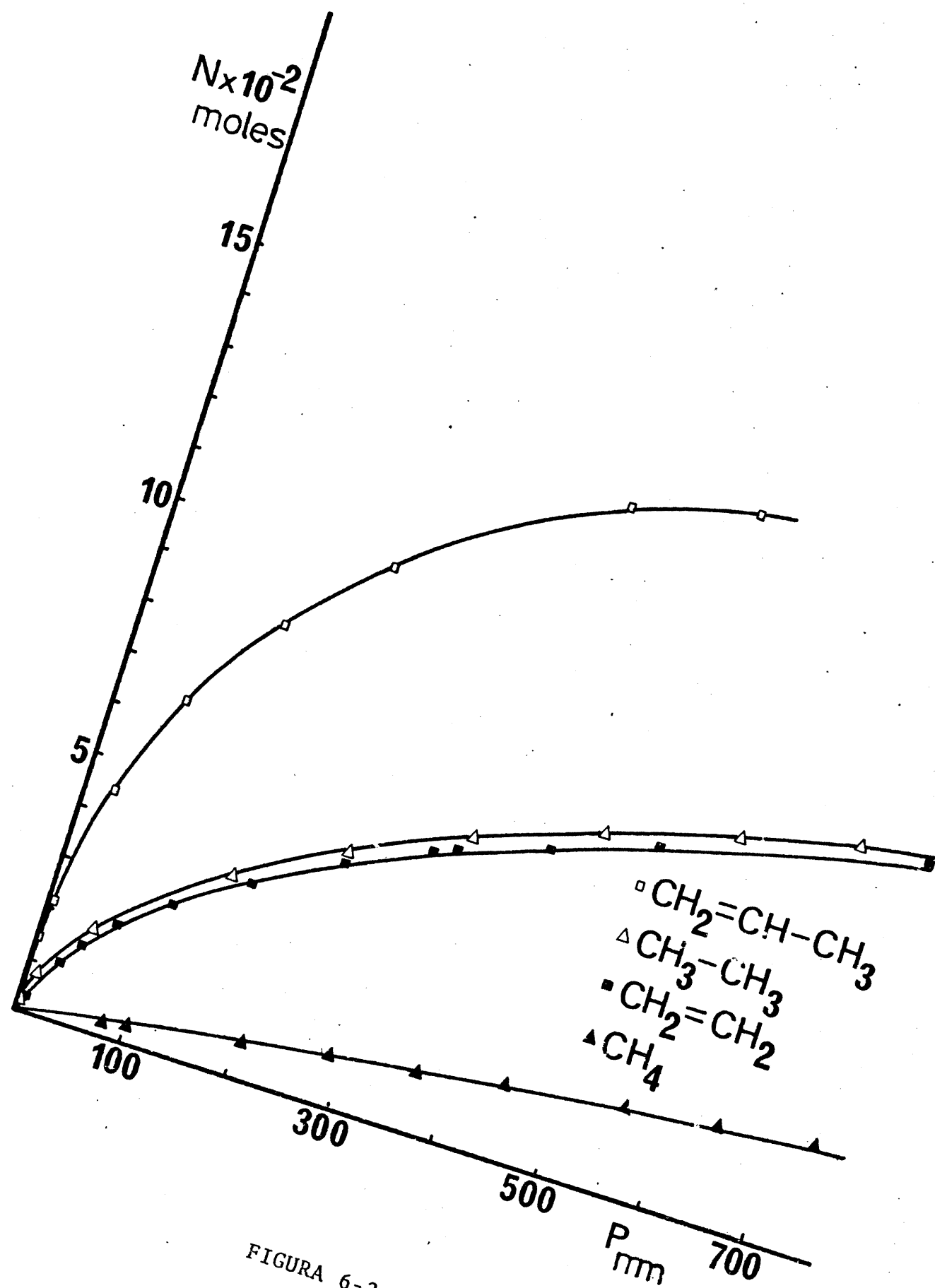


FIGURA 6-2

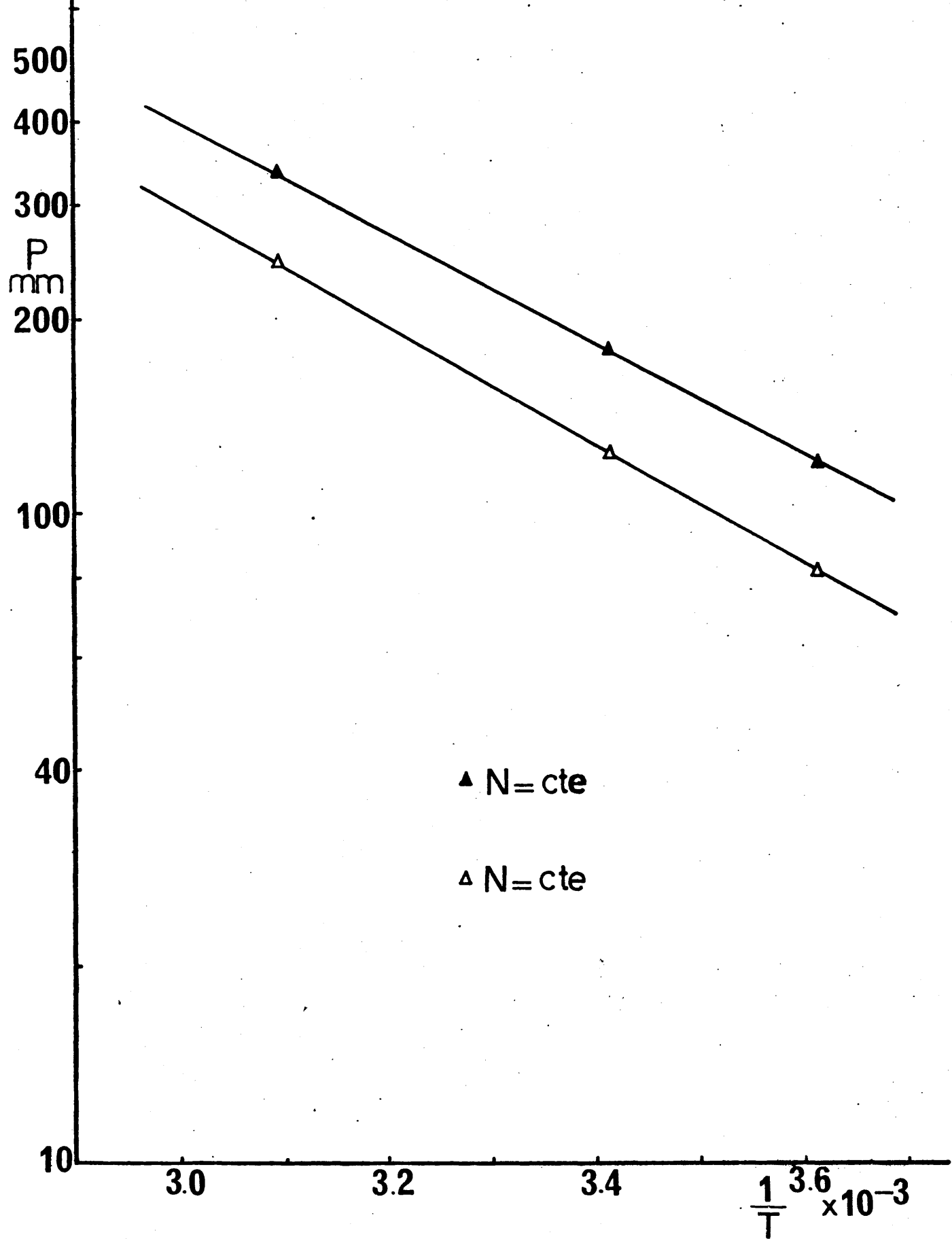


FIGURA 6-3

$N \times 10^{-2}$   
oles

4

3

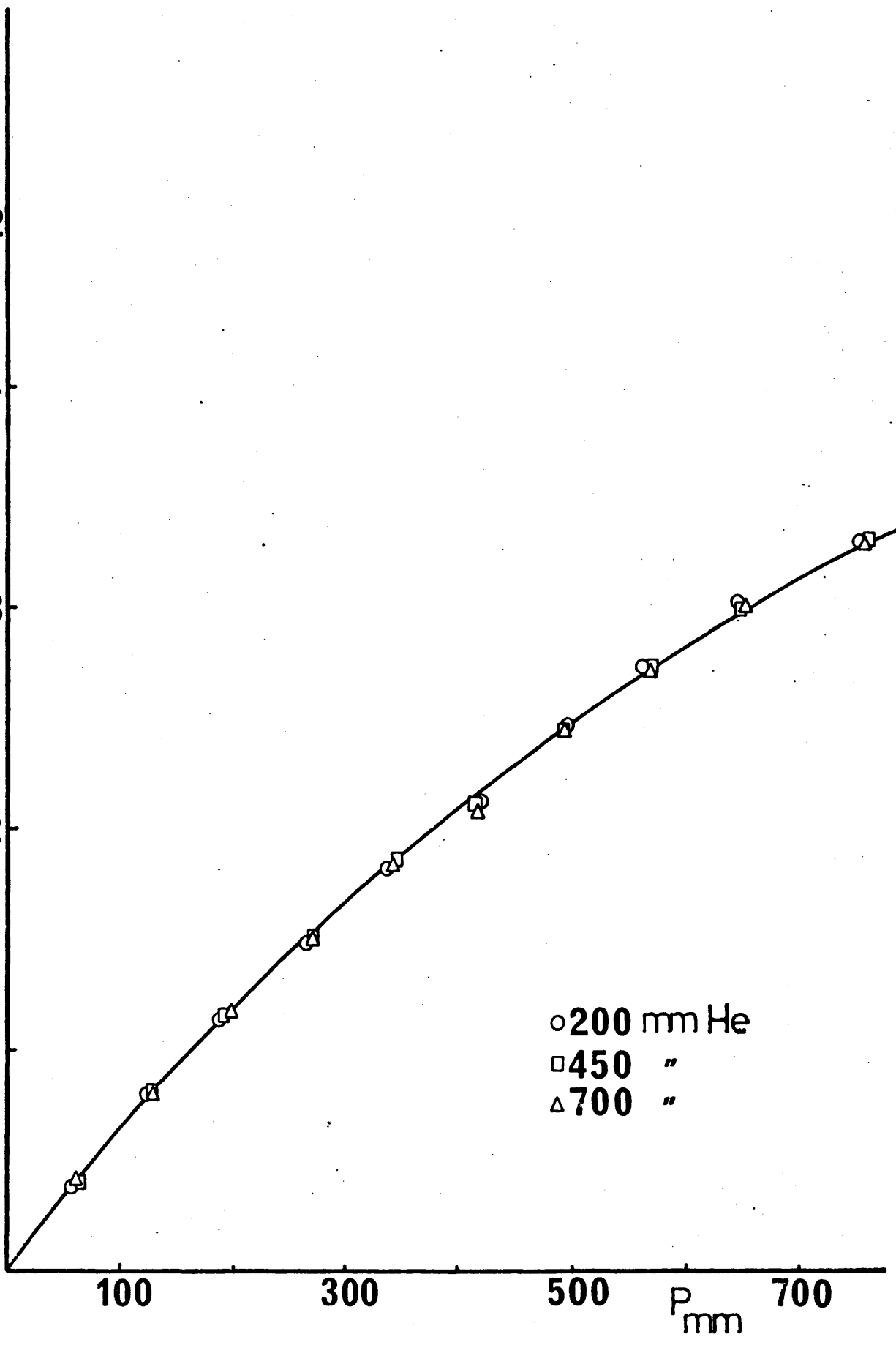
2

1

○ 200 mm He  
□ 450 "  
△ 700 "

100 300 500 700  
P mm

FIGURA 6-4



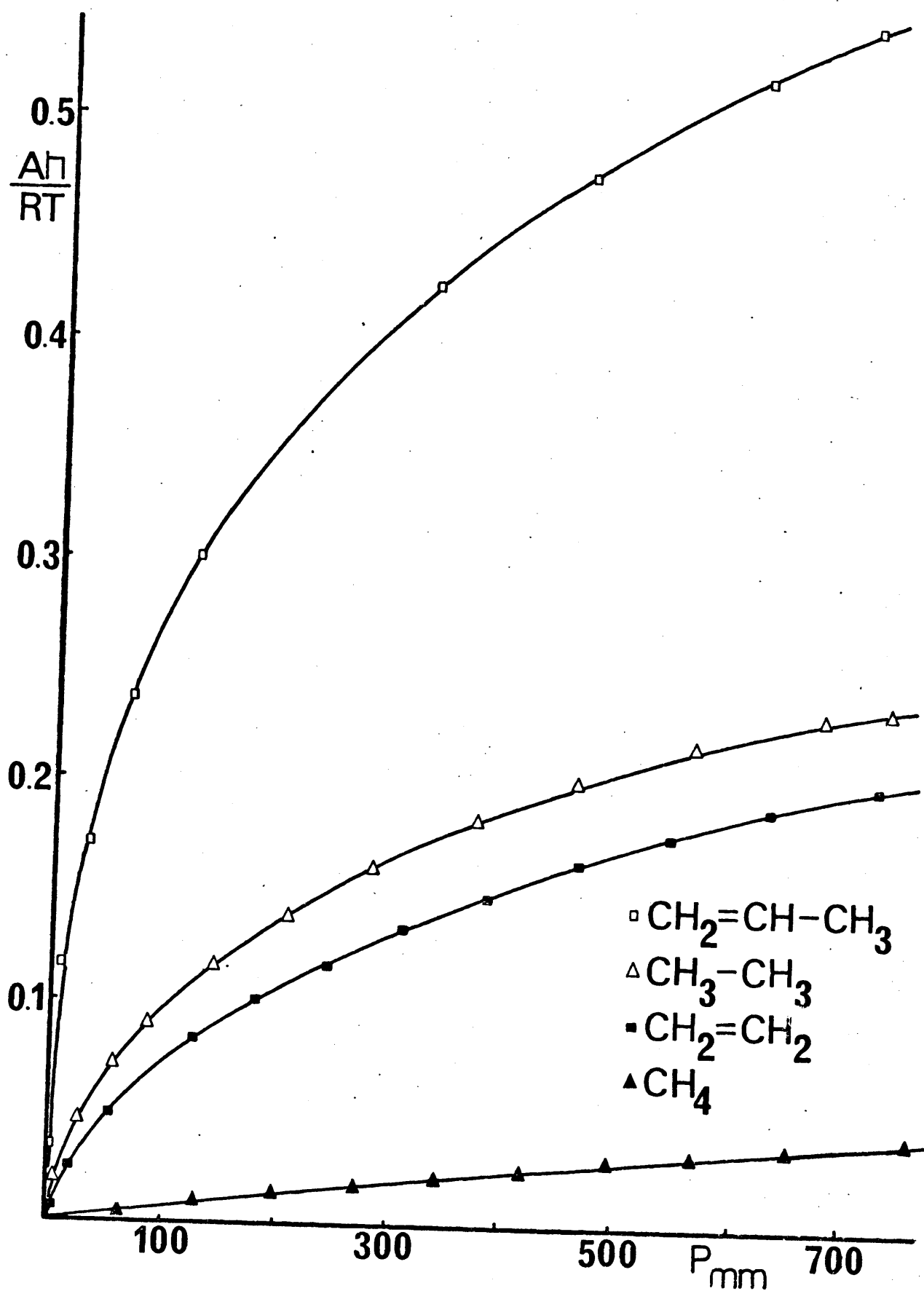


FIGURA 6-5

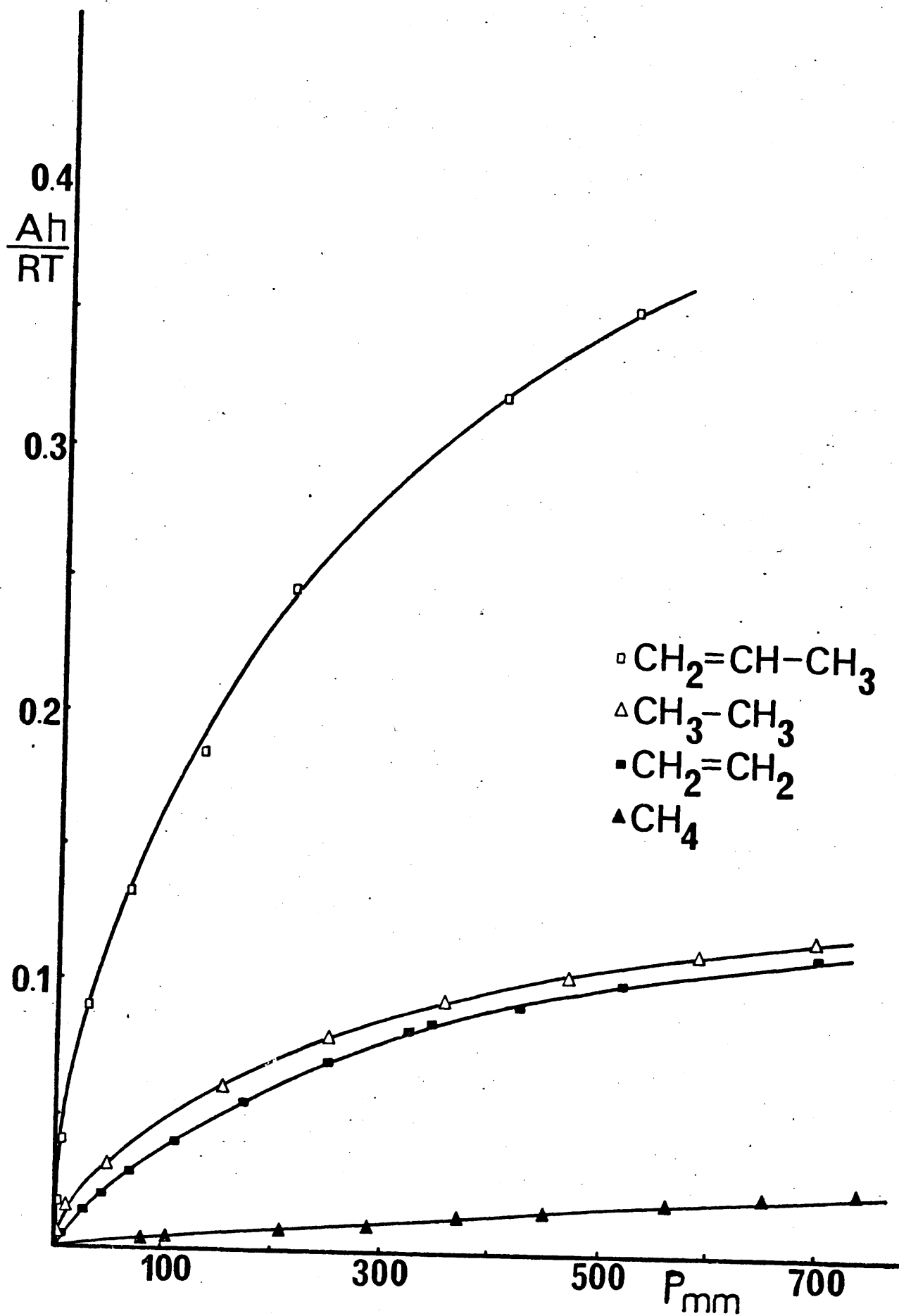


FIGURA 6-6



TABLA 6.1

Presión superficial: Metano ( $M^-$ )

T=20°C		T=50°C	
$P_{M^-}$	$\frac{\Pi A}{RT}$	$P_{M^-}$	$\frac{\Pi A}{RT}$
63.27	$4.7136 \cdot 10^{-3}$	80.00	$3.0000 \cdot 10^{-3}$
131.70	$9.0428 \cdot 10^{-3}$	102.78	$3.7000 \cdot 10^{-3}$
199.12	$1.3046 \cdot 10^{-2}$	208.80	$7.3551 \cdot 10^{-3}$
272.95	$1.7222 \cdot 10^{-2}$	288.34	$9.9926 \cdot 10^{-3}$
344.53	$2.1063 \cdot 10^{-2}$	370.71	$1.2643 \cdot 10^{-2}$
402.05	$2.4968 \cdot 10^{-2}$	451.10	$1.5165 \cdot 10^{-2}$
495.14	$2.8702 \cdot 10^{-2}$	562.90	$1.8590 \cdot 10^{-2}$
571.83	$3.2399 \cdot 10^{-2}$	649.20	$2.1132 \cdot 10^{-2}$
653.87	$3.6193 \cdot 10^{-2}$	737.70	$2.3629 \cdot 10^{-2}$
761.09	$4.0921 \cdot 10^{-2}$	797.30	$2.5260 \cdot 10^{-2}$

TABLA 6.2

Presión superficial: Etileno ( $E^{\circ}$ )

T=20°C		T=50°C	
$P_{E^{\circ}}$	$\frac{\pi A}{RT}$	$P_{E^{\circ}}$	$\frac{\pi A}{RT}$
4.20	$6.0100 \cdot 10^{-3}$	6.50	$4.1500 \cdot 10^{-3}$
17.99	$2.4715 \cdot 10^{-2}$	27.17	$1.3934 \cdot 10^{-2}$
52.09	$4.8466 \cdot 10^{-2}$	42.05	$1.9500 \cdot 10^{-2}$
125.00	$8.2170 \cdot 10^{-2}$	68.22	$2.8447 \cdot 10^{-2}$
181.44	$1.0049 \cdot 10^{-1}$	109.50	$3.9987 \cdot 10^{-2}$
242.32	$1.1688 \cdot 10^{-1}$	173.27	$5.4571 \cdot 10^{-2}$
309.34	$1.3265 \cdot 10^{-1}$	184.38	$5.6845 \cdot 10^{-2}$
384.10	$1.4812 \cdot 10^{-1}$	251.06	$6.9511 \cdot 10^{-2}$
465.00	$1.6298 \cdot 10^{-1}$	324.68	$8.1883 \cdot 10^{-2}$
546.12	$1.7644 \cdot 10^{-1}$	344.13	$8.4928 \cdot 10^{-2}$
632.00	$1.8951 \cdot 10^{-1}$	426.23	$9.1733 \cdot 10^{-2}$
728.00	$2.0020 \cdot 10^{-1}$	520.69	$1.0129 \cdot 10^{-1}$
		700.17	$1.1150 \cdot 10^{-1}$

TABLA 6.3

Presión superficial: Etano ( $E^-$ )

T=20°C		T=50°C	
$P_{E^-}$	$\frac{\pi A}{RT}$	$P_{E^-}$	$\frac{\pi A}{RT}$
1.81	$8.1860 \cdot 10^{-3}$	2.70	$5.5030 \cdot 10^{-3}$
4.75	$1.8213 \cdot 10^{-2}$	10.50	$1.5500 \cdot 10^{-2}$
25.67	$4.5345 \cdot 10^{-2}$	48.41	$3.0900 \cdot 10^{-2}$
56.13	$7.1687 \cdot 10^{-2}$	152.54	$5.9400 \cdot 10^{-2}$
85.38	$8.9378 \cdot 10^{-2}$	251.53	$7.8300 \cdot 10^{-2}$
143.14	$1.1513 \cdot 10^{-1}$	356.47	$9.2600 \cdot 10^{-2}$
208.42	$1.3817 \cdot 10^{-1}$	470.78	$1.0200 \cdot 10^{-1}$
282.90	$1.6015 \cdot 10^{-1}$	590.13	$1.1160 \cdot 10^{-1}$
374.80	$1.8200 \cdot 10^{-1}$	697.26	$1.1750 \cdot 10^{-1}$
463.74	$2.0010 \cdot 10^{-1}$		
564.04	$2.1720 \cdot 10^{-1}$		
680.93	$2.3182 \cdot 10^{-1}$		
737.32	$2.3500 \cdot 10^{-1}$		

TABLA 6.4

Presión superficial: Propileno ( $P^{\text{=}}$ )

T=20°C		T=50°C	
$P_P^{\text{=}}$	$\frac{\pi A}{RT}$	$P_P^{\text{=}}$	$\frac{\pi A}{RT}$
2.56	$3.3659 \cdot 10^{-2}$	2.50	$1.7651 \cdot 10^{-2}$
12.80	$1.1612 \cdot 10^{-1}$	6.00	$4.0400 \cdot 10^{-2}$
30.03	$1.7048 \cdot 10^{-1}$	28.39	$8.9260 \cdot 10^{-2}$
64.90	$2.3558 \cdot 10^{-1}$	64.62	$1.3330 \cdot 10^{-1}$
122.19	$3.0141 \cdot 10^{-1}$	130.64	$1.8490 \cdot 10^{-1}$
209.14	$3.6643 \cdot 10^{-1}$	209.31	$2.2790 \cdot 10^{-1}$
327.70	$4.2685 \cdot 10^{-1}$	402.28	$3.0080 \cdot 10^{-1}$
463.78	$4.7726 \cdot 10^{-1}$	518.97	$3.3330 \cdot 10^{-1}$
618.47	$5.2175 \cdot 10^{-1}$		
713.63	$5.4468 \cdot 10^{-1}$		

## 6.2. ISOTERMAS DE ADSORCION DE MEZCLAS BINARIAS

### 6.2.1. Influencia de las variables: presión y temperatura

En las figuras 6-7 a 6-16 se representan los datos de equilibrio correspondientes a las diferentes mezclas binarias: metano-etileno, metano-etano, etileno-etano, etileno-propileno y etano-propileno, que figuran en las tablas 5-5a a 5-9b. El haz de isotermas resultantes ( una para cada composición inicial), se ha enmarcado entre las correspondientes a los componentes puros.

En cada uno de los haces, se observan variaciones respecto a la presión y a la temperatura analogas a las detalladas en el apartado 6.1 para los componentes puros.

Asi mismo en la figura 6-17 se han representado de la forma fracción molar en el gas  $y_i$ , frente a la fracción molar en el adsorbente  $x_i$ , los datos experimentales de equilibrio para el sistema etano-propileno a 20°C de temperatura y a 75, 100 y 150 mm. de Hg. de presión, pudiendo observarse la escasa incidencia de esta última variable, como sucede en los sistemas líquido-vapor a medida que aumenta la presión la linea de equilibrio se des<sup>u</sup>plaza hacia la diagonal.

### 6.2.2. Cálculo de la presión superficial de las mezclas y de las $P_1^0$ ( $\Pi$ ) y $P_2^0$ ( $\Pi$ )

De acuerdo con lo indicado en la introducción, apartado 2.2.2., para el cálculo de la presión superficial de una cierta mezcla es necesario fijar tanto la temperatura como la suma de presiones de los dos componentes en la fase gaseosa para los que se desea la misma.

Aplicando las ecuaciones [2-20] y [2-21] a los conjuntos de puntos de las diferentes isotermas de los haces de las mezclas binarias correspondientes a la citada suma de presiones, puede calcularse la presión superficial de cada una de ellas a partir -

de sus composiciones y fracciones molares de los adsorbatos en ambas fases (que se deducen directamente de las tablas 5-5a a 5-9b, correspondientes a las figuras 6-7 a 6-16). En las tablas 6-5 a 6-9 se presentan tanto las fracciones molares de los adsorbatos acabados de indicar como las presiones superficiales de las mezclas con ellas calculadas y las presiones que los adsorbatos deberían tener en la fase gaseosa para poder ejercer, por si solos, la presión superficial de la mezcla calculada, es decir, la magnitud  $P_i^0(\Pi)$ , de la ecuación [2-14], calculadas a su vez del modo detallado en la introducción, apartado 2.2.2.

Las presiones totales (suma de las de los componentes) elegidas fueron 75 y 100mm. de Hg., ya que para presiones superiores los valores de sus presiones superficiales de las mezclas,  $\frac{\Pi y_1 y_2^A}{RT}$ , que resultaban eran tan elevadas que al calcular mediante ellas las presiones de los adsorbatos  $P_i^0(\Pi)$  acabadas de indicar a partir de las curvas de las figuras 6-5 y 6-6, correspondientes a los componentes puros, resultaban valores de las mismas muy superiores al intervalo de presiones experimentales considerado.

En el apendice 9.2.5. se detalla el cálculo de la presión superficial de una mezcla binaria a partir de los datos experimentales así como el cálculo de las correspondientes presiones  $P_i^0(\Pi)$  y  $P_2^0(\Pi)$ , ecuación [2-14] de cada uno de los adsorbatos de dichas mezclas.

### 6.2.3. Cálculo de los coeficientes de actividad y reproducción de los datos de equilibrio

#### i) *Cálculo directo*

Para las cinco mezclas binarias consideradas, a todas las temperaturas y presiones investigadas, a partir de los valores  $P_i^0(\Pi)$ , calculados en el apartado anterior y los correspondientes datos de equilibrio experimentales, tablas 6-5 a 6-9, se calcularon los coeficientes de actividad de los dos componentes de cada mezcla mediante la ecuación de Dalton y Raoult, [2-14],

resumiendose los valores encontrados en las columnas tercera y cuarta de las tablas 6-10 a 6-14.

## ii) Ecuación de Wilson

En la ecuación de Wilson, [2-28] , sus constantes  $\Lambda_{ij}$  y  $\Lambda_{ji}$  son función exclusiva de la composición de la fase adsorbida y de los correspondientes coeficientes de actividad. Descartada su evaluación a partir de las ecuaciones de Wilson simplificadas, para dilución infinita, de sus componentes dada la escasez de datos experimentales en tales regiones, se prefirió calcularlas mediante un programa de regresión no lineal en el que las ecuaciones se aplicaban a todos los puntos experimentales utilizando los valores de los coeficientes de actividad encontrados para los mismos, columna primera, tercera y cuarta de las tablas 6-10 a 6-14. En estas y en el sector de cada una de ellas correspondiente a la ecuación que se considera se resumen los valores de las constantes  $\Lambda_{ij}$  y  $\Lambda_{ji}$  encontrados para las cinco mezclas binarias en las condiciones de presión y temperatura que se indican.

Finalmente a partir de los valores de las constantes  $\Lambda_{ij}$  y  $\Lambda_{ji}$ , y para las fracciones molares de adsorbato en el adsorbente que se indican en la primera columna de las repetidas tablas 6-10 a 6-14, mediante la ecuación de Wilson, se calcularon los correspondientes coeficientes de actividad, columnas quinta y sexta de dichas tablas, y mediante ellas y la ecuación de Dalton y Raoult, [2-14] , los valores que resultaban para las fracciones molares de los componentes en la fase gaseosa, así como sus diferencias respecto a los valores experimentales, (segunda columna de las tablas 6-10 a 6-14), columnas séptima y octava de las tablas respectivamente.

Algunos de estos datos, concretamente los correspondientes a las mezclas binarias a 20°C de temperatura y 75mm. de presión se representa, a modo de ejemplo en las figuras 6-18 a 6-22, como diagramas X-Y. También los coeficientes de actividad calculados directamente y mediante la ecuación de Wilson para estas -

mezclas en las condiciones citadas, se representan frente a la composición de la fase adsorbida en las citadas figuras 6-18 a 6-22.

La discrepancia entre los valores de los coeficientes de actividad calculados directamente y a partir de la ecuación de Wilson nunca rebasó el 4%, circunstancia que puede parecer - lógica dada la naturaleza de la ecuación de Wilson con sus dos constantes, que fueron calculadas a partir de todos sus valores experimentales, pero relevante si se piensa que las dos constantes indicadas son comunes al sistema formado por la ecuación de Wilson aplicada a los dos componentes de la mezcla binaria.

Las figuras 6-18 a 6-22 que muestran la curva de variación de los coeficientes de actividad calculados directamente y mediante la ecuación de Wilson con la composición, ponen claramente de manifiesto la consistencia de los datos experimentales, su adecuada interpretación termodinámica y la validez de las - premisas planteadas por Wilson para el caso del equilibrio liquido-vapor, en el nuestro entre gas y fase adsorbida.

Así mismo, las curvas de las figuras 6-18 a 6-21 indican la acusada desviación de la idealidad de cuatro de las mezclas binarias estudiadas a causa de la disparidad química de sus componentes, que se traduce en capacidades de adsorción distintas y competencia entre ellos por ocupar los centros activos del adsorbente. Únicamente en el caso de la mezcla etileno-etano, figura 6-22, se aprecia que los coeficientes de actividad de los - componentes se alinean sobre el eje de abscisas es decir, tienen valor unidad, debido a la similitud química de los mismos y consiguiente igualdad en su capacidad de adsorción.

### iii) Ecuación de UNIQUAC

En la ecuación UNIQUAC [2-33] sus constantes  $\tau_{ij}$  y  $\tau_{ji}$ , son función de la composición de la fase adsorbida, coeficientes de actividad, y los parámetros estructurales  $r_i$  (fracción de segmentos medios),  $s_i$  (fracción de superficies medias), y del índice



de coordinación  $z$ , que en nuestra investigación supusimos constante e igual a diez para los cuatro componentes de las cinco mezclas binarias, de acuerdo con la bibliografía (44).

Como en el caso de la ecuación de Wilson se descartó la evaluación de las indicadas constantes a partir de las ecuaciones simplificadas para dilución infinita y se calcularon mediante un programa de regresión no lineal para todos los puntos experimentales.

En las tablas 6-10 a 6-14 y en la cabecera del sector de cada una de ellas correspondiente a la ecuación que se considera se resumen los valores de los parámetros estructurales  $r_i$  y  $s_i$  para cada componentes de la mezcla considerada, así como el índice de coordinación  $z=10$  y los valores de las constantes  $\tau_{ij}$ ,  $\tau_{ji}$  encontrados para las cinco mezclas binarias en las condiciones de temperatura y presión que se indican.

Finalmente y a partir de los valores de dichas constantes y para las fracciones molares el adsorbato en el adsorbente que se indica en la primera columna de las tablas 6-10 a 6-14, se calcularon mediante la ecuación UNIQUAC los coeficientes de actividad, columnas novena y decima de dichas tablas y mediante ellos en la ecuación de Dalton y Raoult [2-14], los valores que resultaban para las fracciones molares de los componentes en la fase gaseosa así como sus diferencias respecto a los valores experimentales, columnas onceava y doceava de las repetidas tablas..

Algunos de estos datos, concretamente los mismos que se eligieron en el caso de la ecuación de Wilson, se representan a modo de ejemplo en las mismas figuras 6-18 a 6-22 que en tonces, como diagramas  $X-Y$  log.  $\gamma-X$

La discrepancia entre los valores de los coeficientes de actividad calculados directamente y a partir de la ecuación UNIQUAC, nunca rebasó el 5%, circunstancia que confirma cuanto se ha dicho en el apartado anterior referente a la ecuación de Wilson.

Dada la imposibilidad de evaluar los parámetros  $r_i$ ,  $s_i$  y  $z$  directamente para las moléculas de los distintos componentes en la fase adsorbida, se tomaron los valores de estos correspondientes a la fase líquida propuestos por Abrams y Pransnitz (43). Las reducidas discrepancias a que se acaba de aludir confirmaron que esta hipótesis no es del todo desacertada, es decir que en los casos estudiados la proximidad de las moléculas en la fase adsorbida era similar a la correspondiente en fase líquida.

### 6.3. ISOTERMAS DE ADSORCION DE MEZCLAS TERNARIAS

#### 6.3.1. Influencia de las variables: presión y temperatura

En las figuras 6-23 a 6-26 se representan los datos de equilibrio correspondientes a las dos mezclas ternarias: metano-etileno-etano y etileno-etano-propileno, que se dan resumidos en las tablas 5-10a a 5-11b. El haz de isothermas resultante (una para cada mezcla con una determinada composición inicial), queda enmarcado entre las correspondientes a los componentes puros más y menos adsorbibles respectivamente, quedando intercalada en el haz la correspondiente al componente puro con capacidad de adsorción intermedia. Las variaciones de las isothermas de cada haz, respecto a la presión y a la temperatura son análogas a las ya indicadas en el apartado 6.1 para los compuestos puros.

#### 6.3.2. Predicción teorica de las composiciones de equilibrio

##### i) *Ecuación de Wilson*

En las dos mezclas ternarias consideradas, a las presiones y temperaturas investigadas, y para las fracciones molares de los adsorbatos en ambas fases, deducidas por interpolación en las figuras 6-23 a 6-26, que se indican en las columnas primera y sexta de las tablas 6-15 y 6-17, se calcularon los coeficientes de actividad de sus tres componentes adsorbidos, columnas séptima, octava y novena de las tablas 6-15 y 6-17, mediante la ecuación de Wilson, ecuación [2-28], y los parámetros carac

terísticos  $\Lambda_{ij}$  y  $\Lambda_{ji}$  de cada una de las cinco mezclas binarias correspondientes a las dos ternarias que se consideran, ya calculados (apartado 6.2.3.) y reseñados en las tablas 6-10 a 6-14. A continuación y por un método de tanteos se determinó la presión superficial de la mezcla  $\frac{\pi y_1 y_2 y_3^A}{RT}$ , que considerada en las ordenadas de las curvas  $\frac{\pi A}{RT}$  frente a P correspondientes a los componentes puros, figuras 6-5 y 6-6, determinaba abscisas  $P_1^0(\pi)$ ,  $P_2^0(\pi)$  y  $P_3^0(\pi)$  de dichos componentes que sustituidos en la ecuación de Dalton y Raoult, ecuación [2-14], para los mismos y las composiciones correspondientes conduciran a fracciones molares de aquellos en la fase gaseosa que cumplieran la ineludible condición:  $y_1 + y_2 + y_3 = 1$ . En las columnas decima onceava, doceava y treceava se presentan los valores encontrados en cada caso, tanto de la presión superficial de la mezcla  $\frac{\pi y_1 y_2 y_3^A}{RT}$  como de las tres presiones  $P_1^0(\pi)$ ,  $P_2^0(\pi)$  y  $P_3^0(\pi)$ . También en las mismas tablas y en las columnas catorceava, quinceava y dieciseisava se resumen los valores ultimamente indicados de las fracciones molares de los tres componentes en la fase gaseosa, que se comprende son los predichos teóricamente por la ecuación de Wilson, así como sus desviaciones, respecto a los valores experimentales, columnas tercera, cuarta y quinta y en las columnas diecisieteava, dieciochoava y diecinueveava de las repetidas tablas.

## ii) Ecuación UNIQUAC

En las mezclas ternarias consideradas, a las presiones y temperaturas investigadas para las fracciones molares de los adsorbatos en ambas fases, deducidas por interpolación en las figuras 6-23 a 6-26 que se indican en las columnas primera a sexta de las tablas 6-16 y 6-18, se calcularon los coeficientes de actividad de sus tres componentes adsorbidos, columnas séptima, octava y novena de las tablas 6-16 y 6-18, mediante la ecuación UNIQUAC, ecuación [2-33] y los parámetros característicos  $\tau_{ij}$  y  $\tau_{ji}$  de cada una de las cinco mezclas binarias correspondientes a las dos ternarias que se consideran, calculadas en el apartado 6.2.3. y reseñadas en las tablas 6-10 a 6-14. A continuación y siguiendo un procedimiento totalmente paralelo al empleado en el caso de la ecuación de Wilson, se determinaron la presión su

perificial de la mezcla  $\frac{\pi y_1 y_2 y_3^A}{RT}$  y los valores de  $P_1^0(\pi)$ ,  $P_2^0(\pi)$  y  $P_3^0(\pi)$  de cada uno de los  $RT$  componentes, columnas decima, onceava, doceava y treceava de las citadas tablas 6-16 y 6-18 así como las correspondientes fracciones molares de aquellos en la fase gaseosa, es decir, las predichas teóricamente por la ecuación UNIQUAC, columnas catorceava, quinceava y dieciseisava de las citadas tablas. En las columnas diecisieteava, dieciochoava y diecinueveava de estas últimas se resumen también la diferencia entre tales valores y los experimentales (columnas tercera, cuarta y quinta).

### iii) Precisión de las predicciones teóricas

La precisión alcanzada en la predicción de los datos de equilibrio de las mezclas ternarias, tanto con la ecuación de Wilson ( 2-28 ) como con la ecuación UNIQUAC ( 2-33 ) fue similar, y coincidente con la conseguida en la reproducción de los datos de equilibrio de las mezclas binarias, apartado 6.2.3. Concretamente en las columnas diecisieteava, dieciochoava y diecinueveava de las tablas 6-15 a 6-17 puede apreciarse que el valor máximo de las discrepancias fué del 10% para mezclas gaseosas en equilibrio con fracciones molares de algunos de los componentes comprendidas entre 0.001 y 0.01, que han sido señaladas con asterisco.

Se comprende que el error puede ser mayor en el caso de diluciones extremas de algunos de los componentes de las mezclas multicomponentes y por supuesto del mismo orden de magnitud del que correspondería a dos determinaciones experimentales sucesivas para tan extremas diluciones, pero estos casos suelen ser menos frecuentes en la práctica.

Se han procurado barrer experimentalmente los máximos intervalos de composiciones de ambas mezclas ternarias. No se ha podido llegar a composiciones de la fase adsorbida en equilibrio muy diluida en los componentes menos adsorbibles (metano en un caso y etileno y etano en el otro), debido a que la presión superficial  $\frac{\pi y_1 y_2 y_3^A}{RT}$  que correspondía a tales fases adsorbidas era tan

elevada que resultaba inviable el cálculo de las presiones  $P_i^0(\pi')$  que en la ley de Dalton y Raoult, ecuación [2-14], corresponden a los componentes menos adsorbibles indicados, como claramente se advierte en las figuras 6-5 y 6-6.

Resumiendo, se considera que la amplitud de intervalos de composiciones barridas con las dos mezclas ternarias a las dos temperaturas y presiones estudiadas son suficiente para juzgar que la precisión alcanzada en la predicción de los datos de equilibrio con ambas ecuaciones, Wilson y UNIQUAC, es válida para cualquier composición de las citadas mezclas. Es de esperar, a su vez, la validez del método para cualquier mezcla multicomponente y cualquier adsorbente.

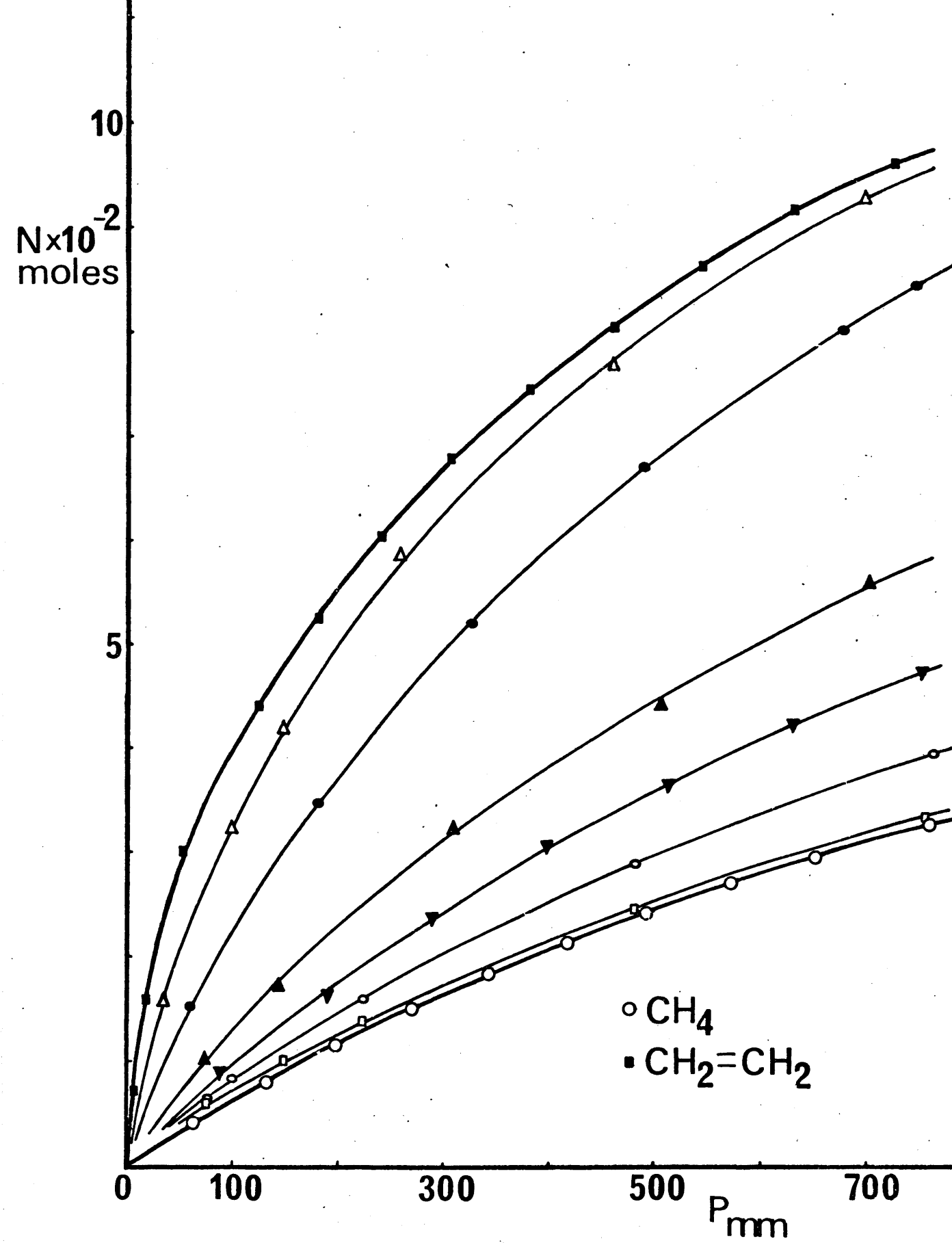


FIGURA 6-7

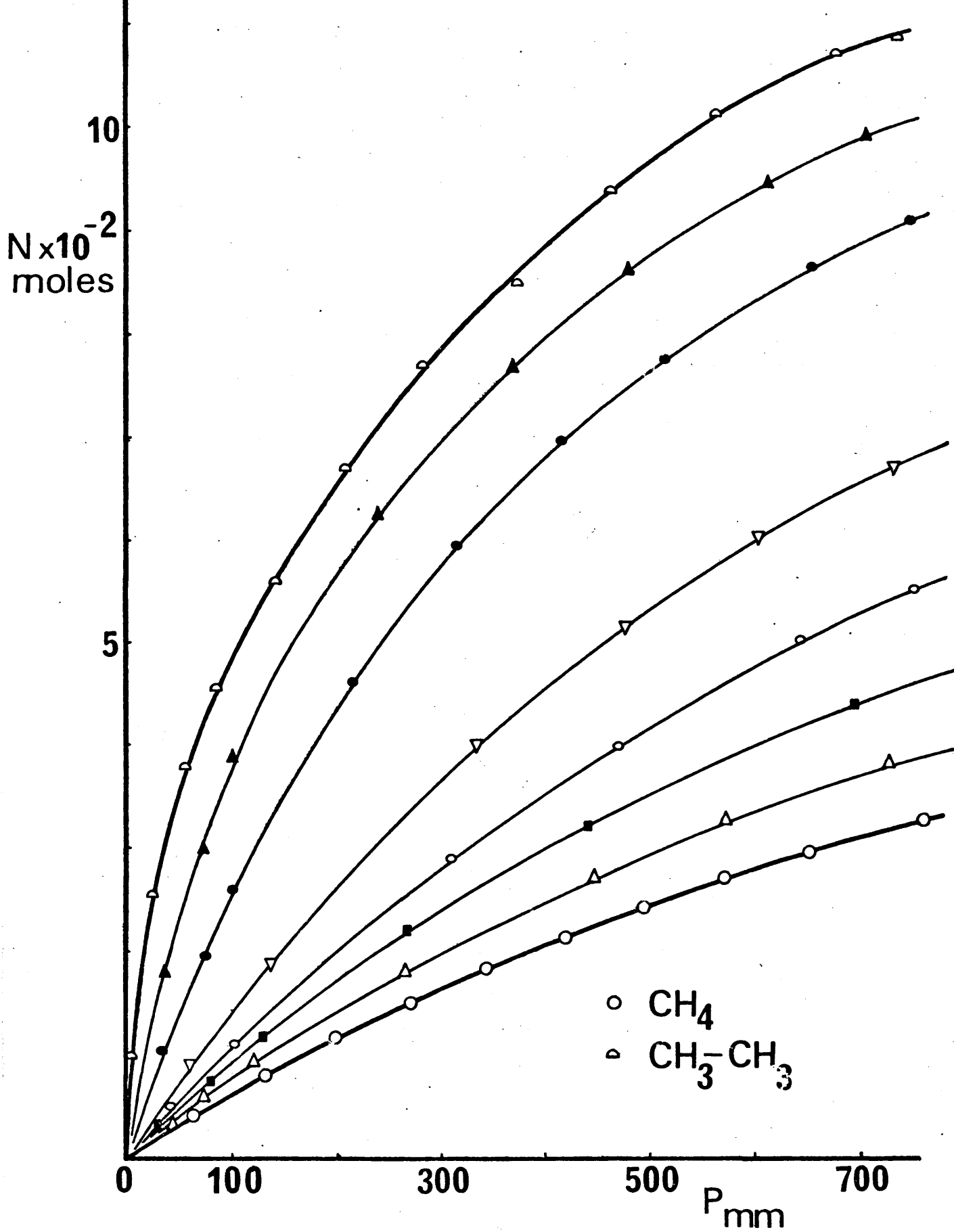


FIGURA 6-8

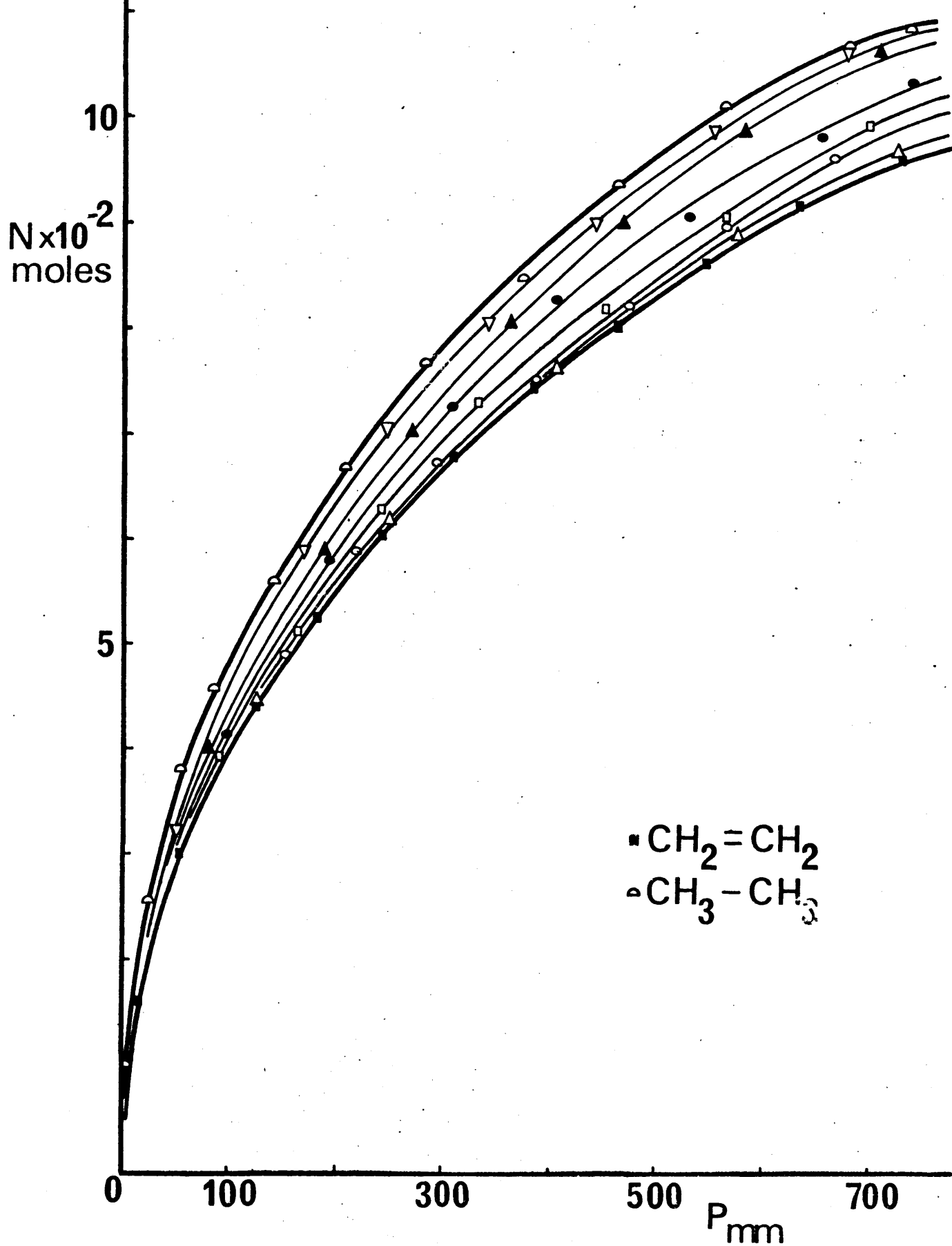


FIGURA 6-9



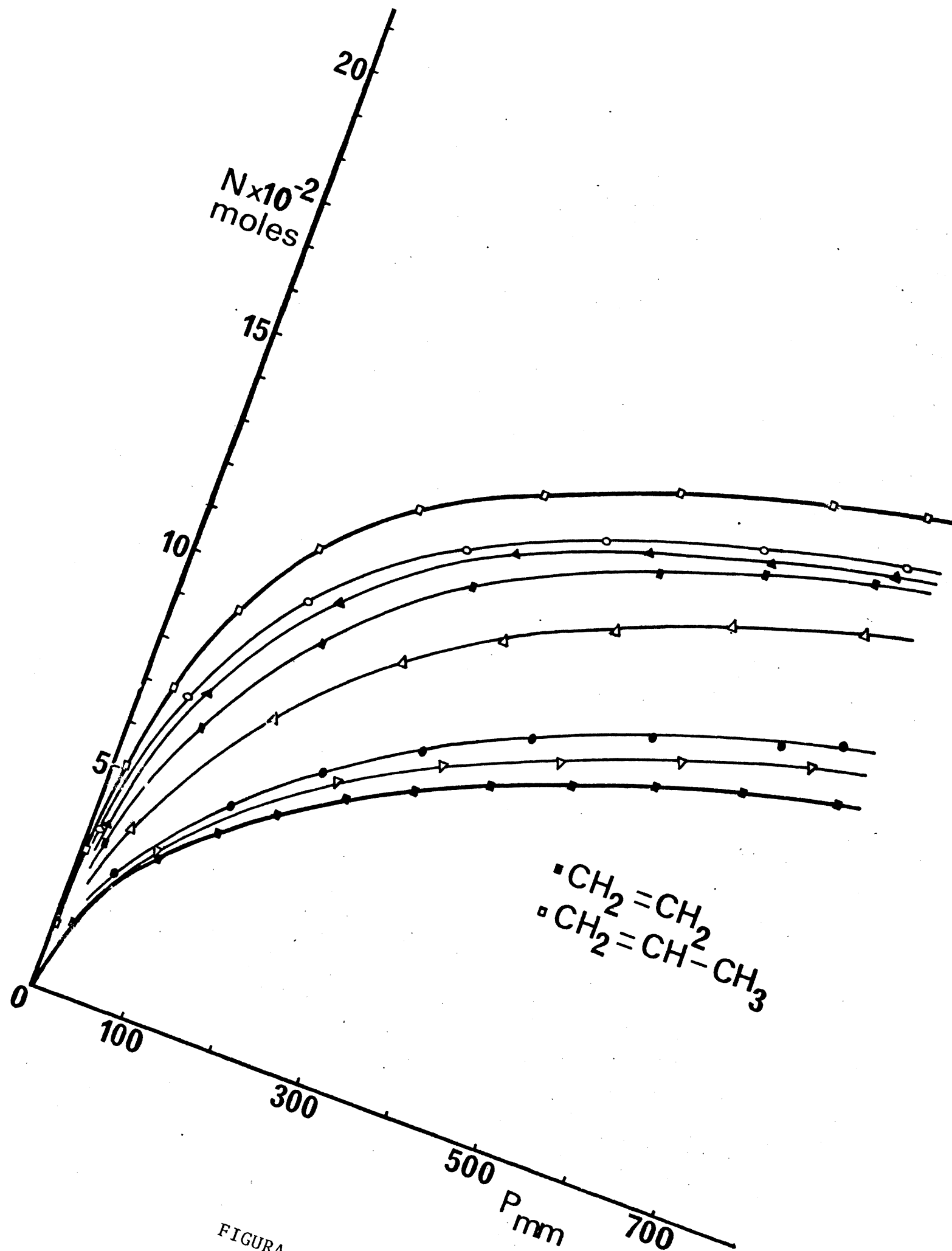


FIGURA 6-10

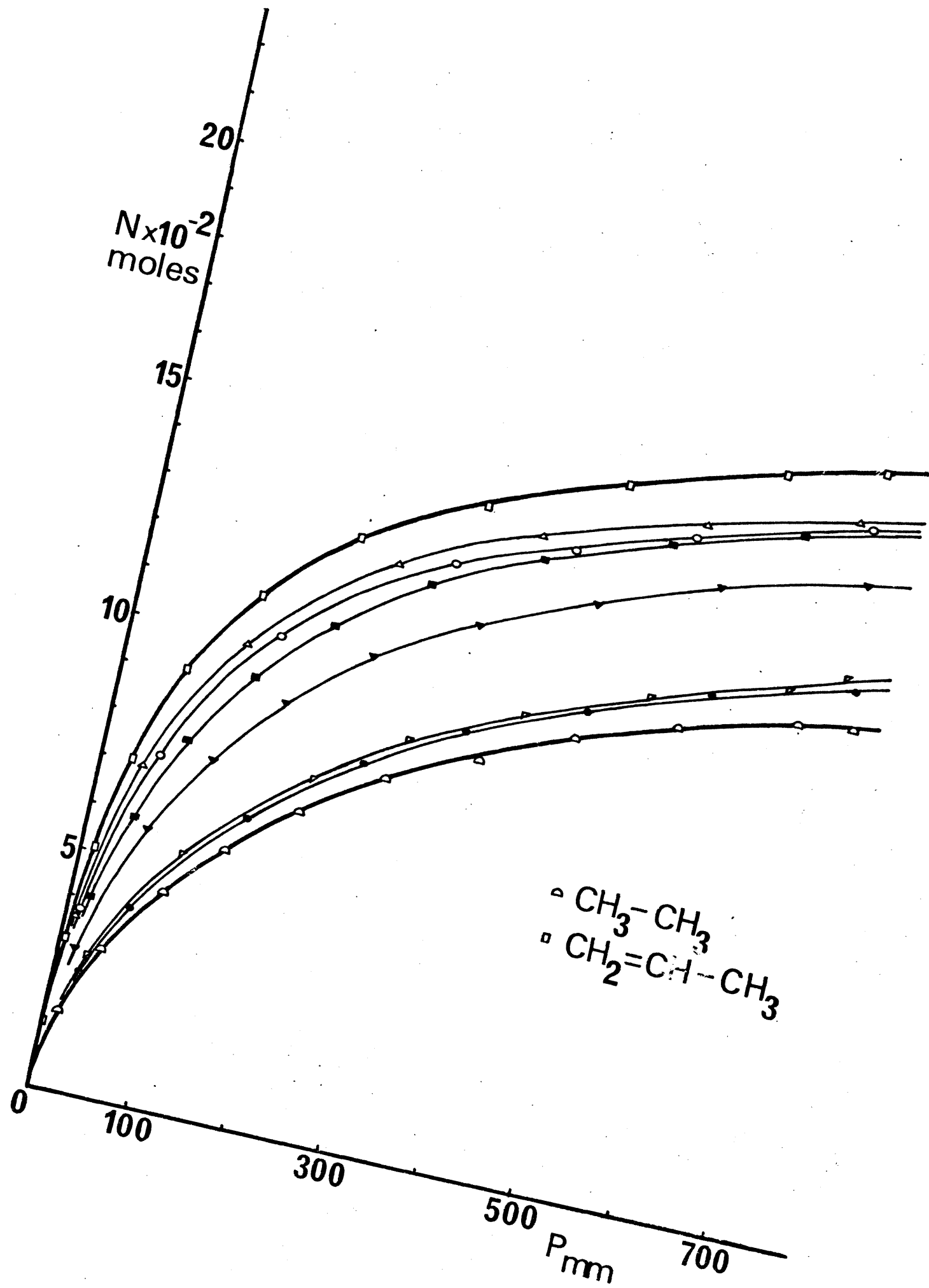


FIGURA 6-11

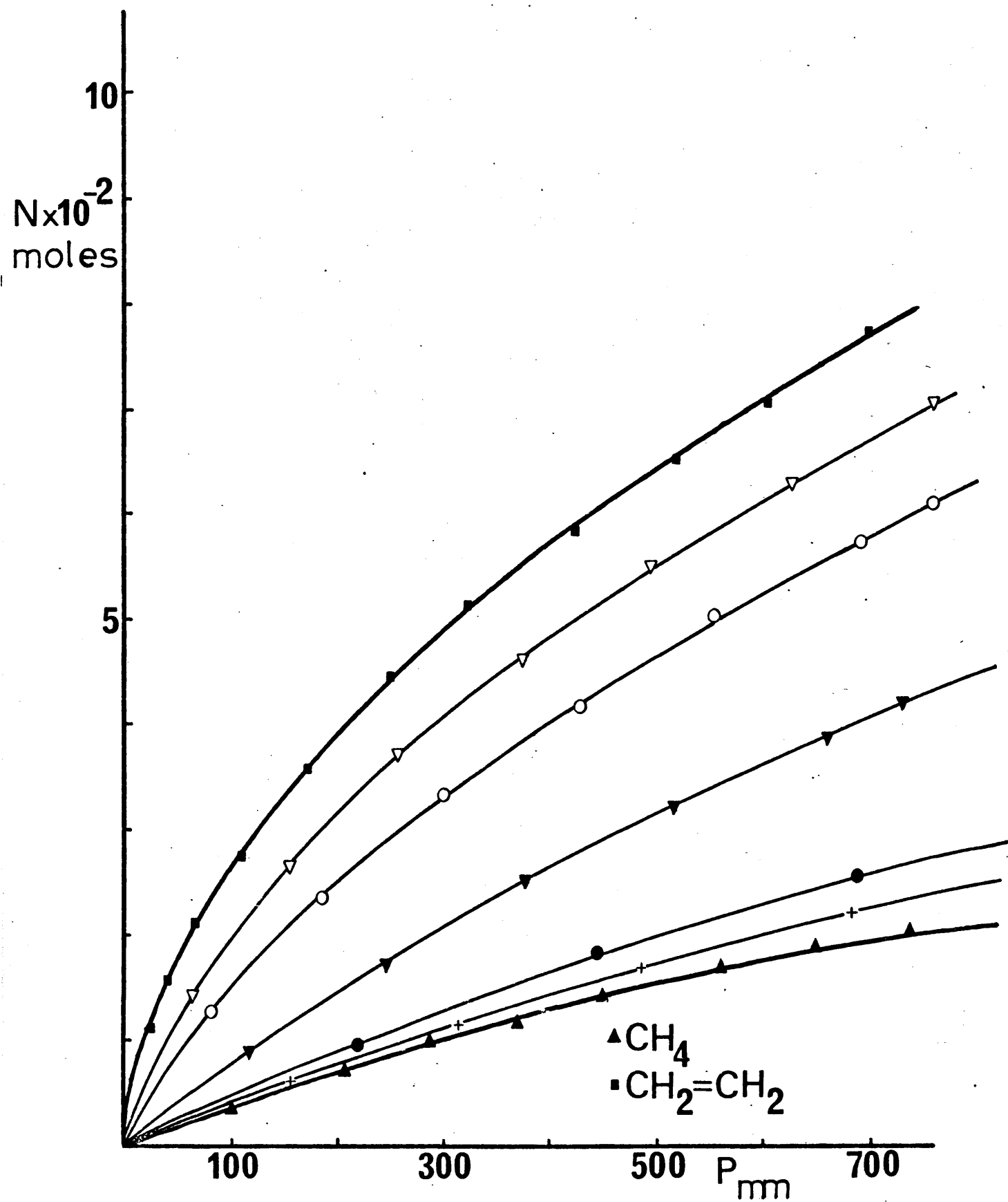


FIGURA 6-12

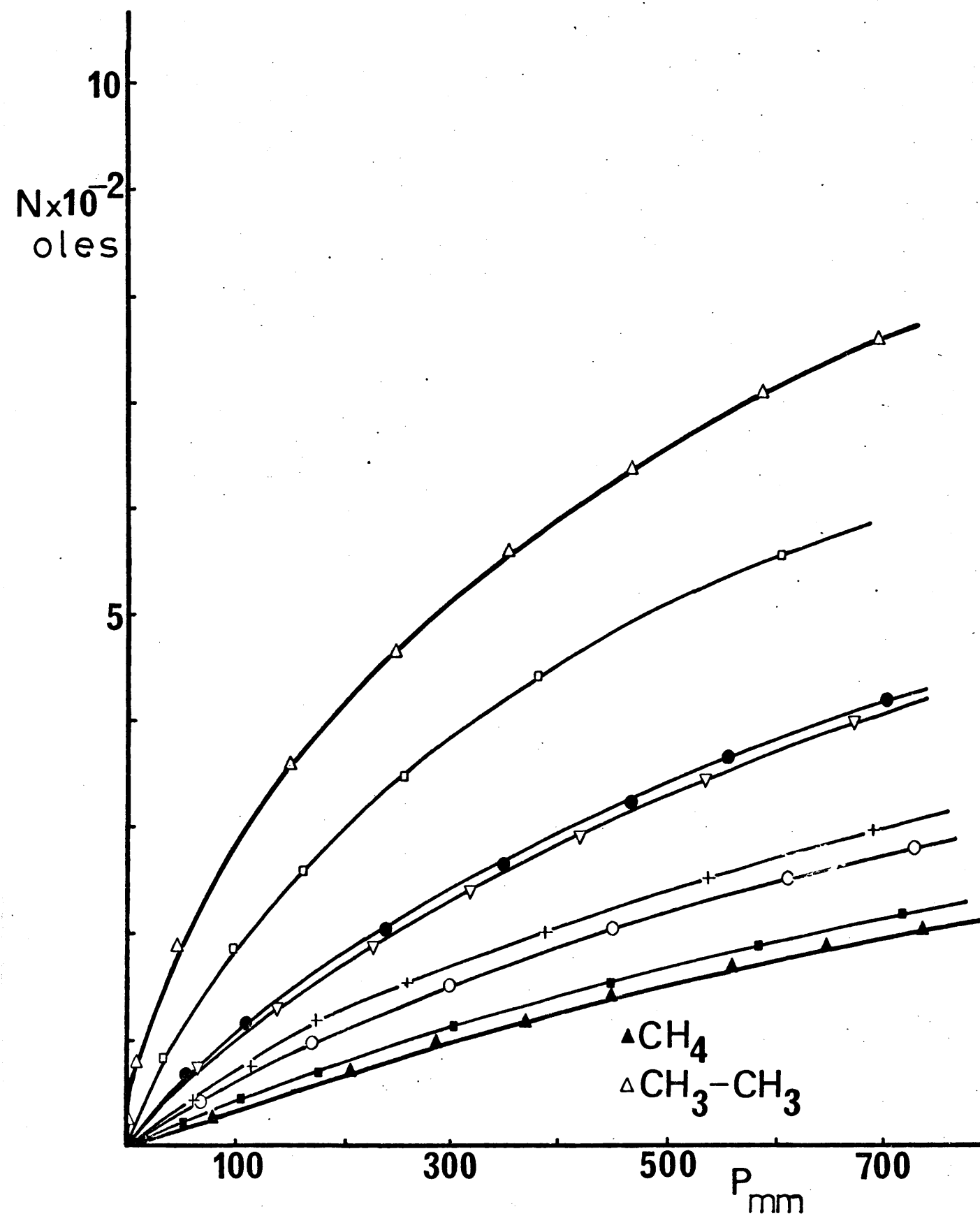


FIGURA 6-13

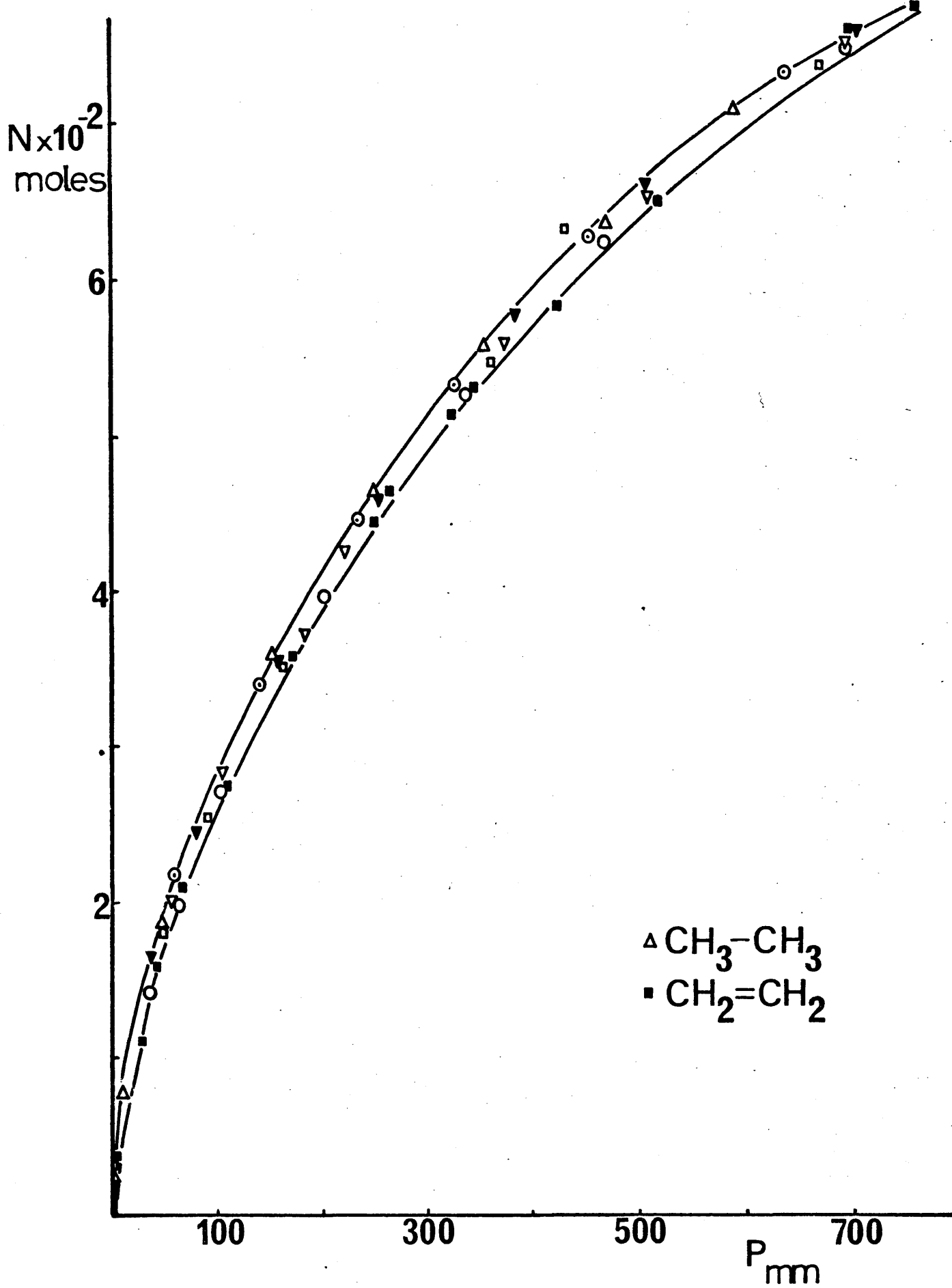


FIGURA 6-14

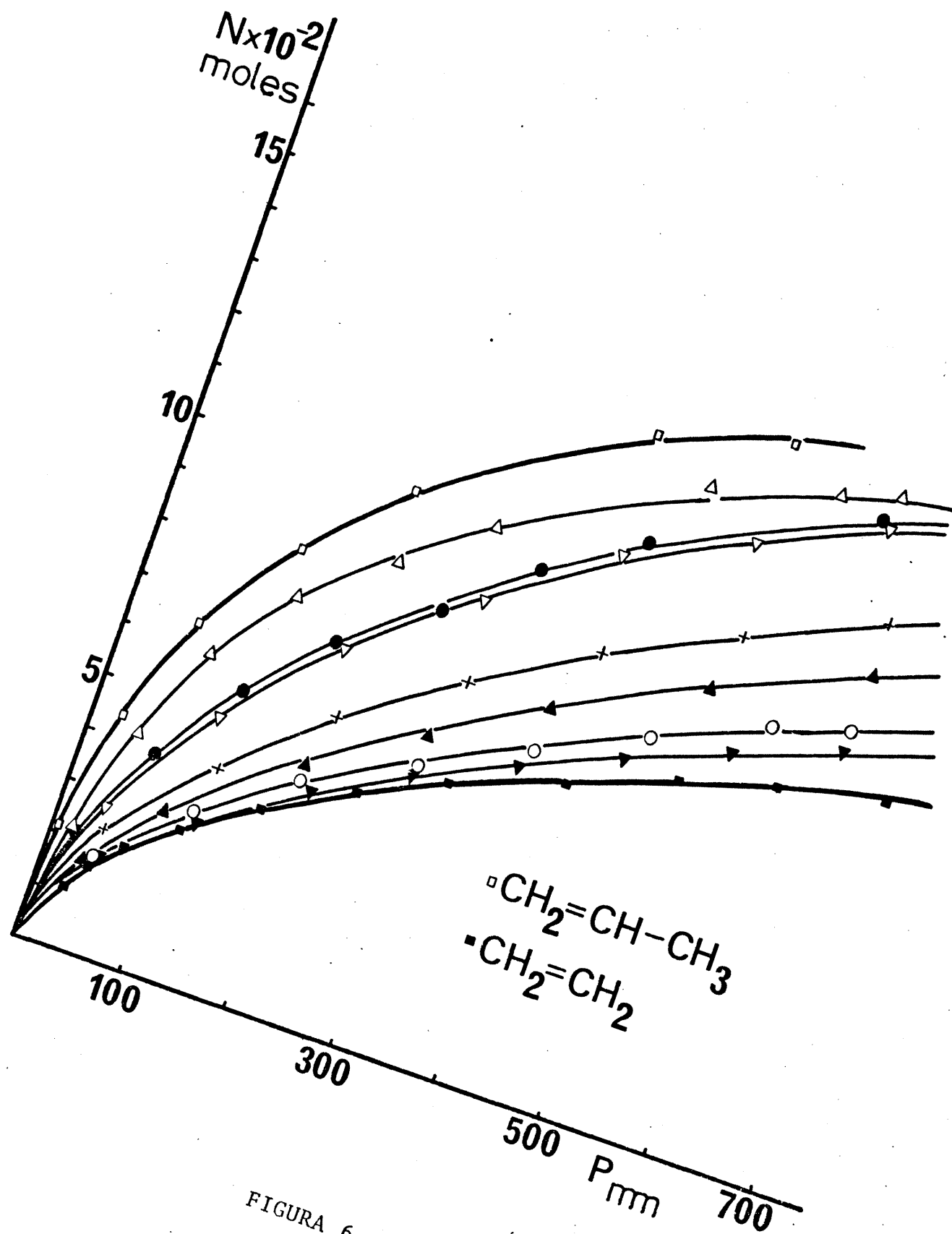


FIGURA 6-15

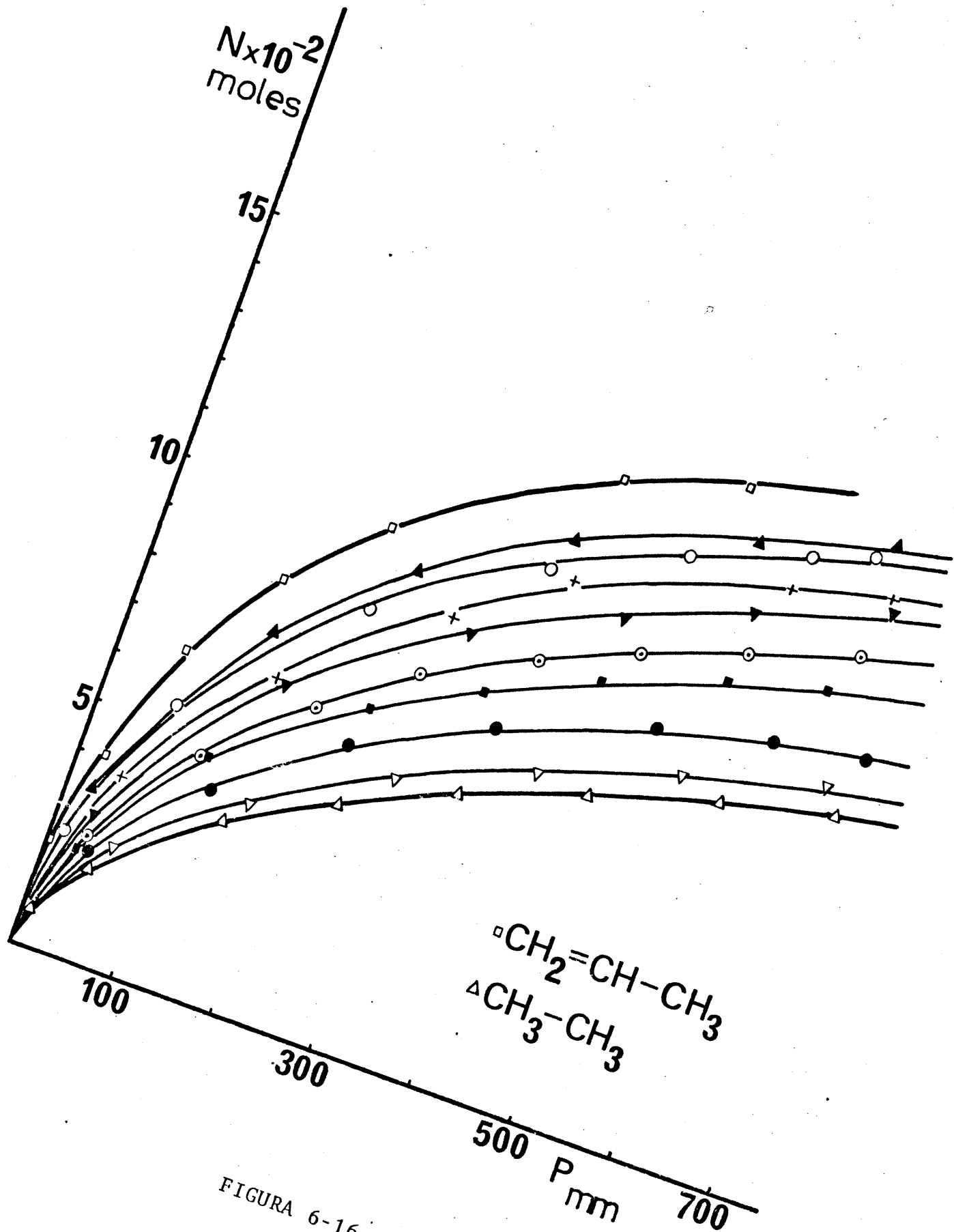


FIGURA 6-16

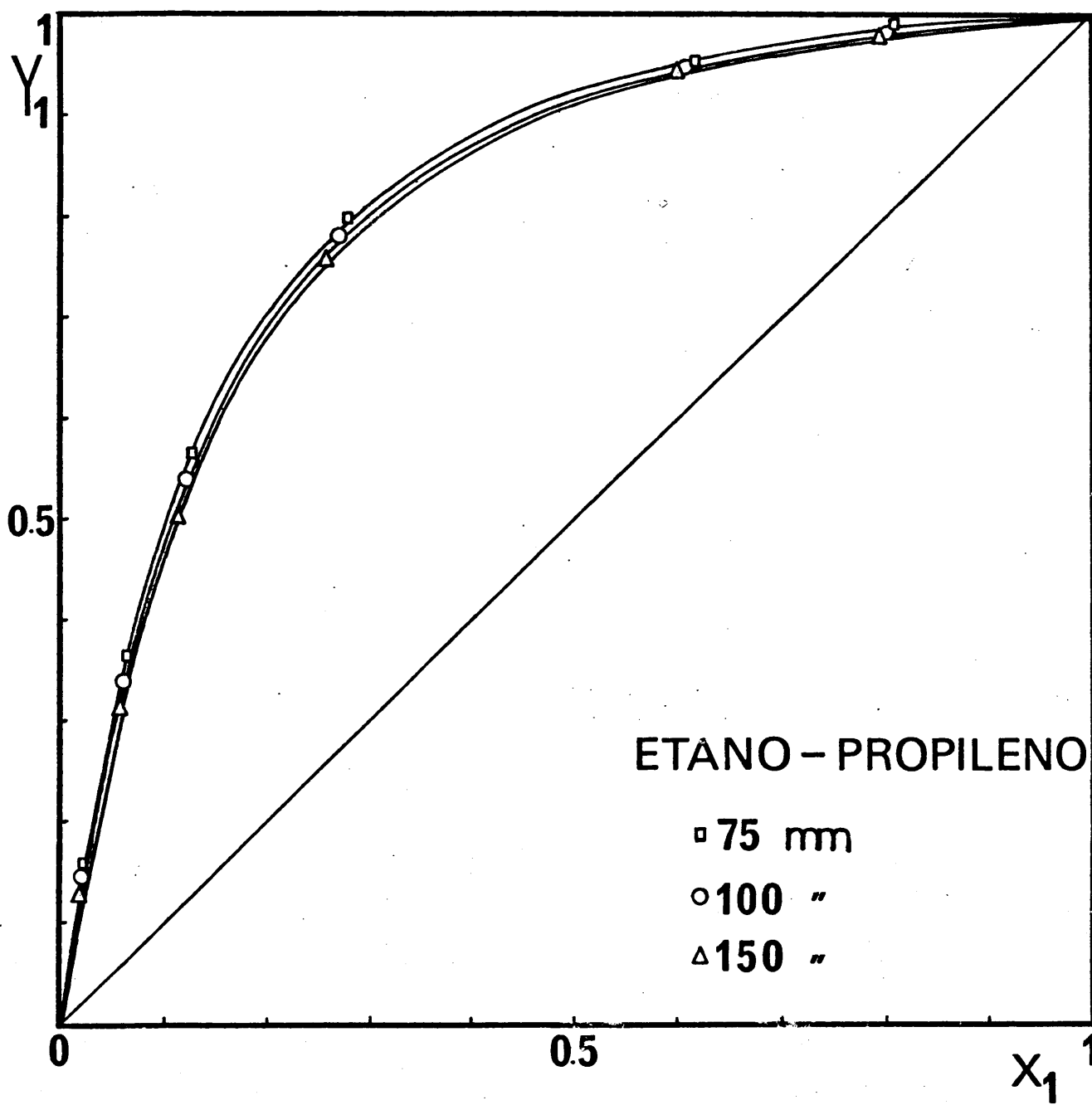


FIGURA 6-17



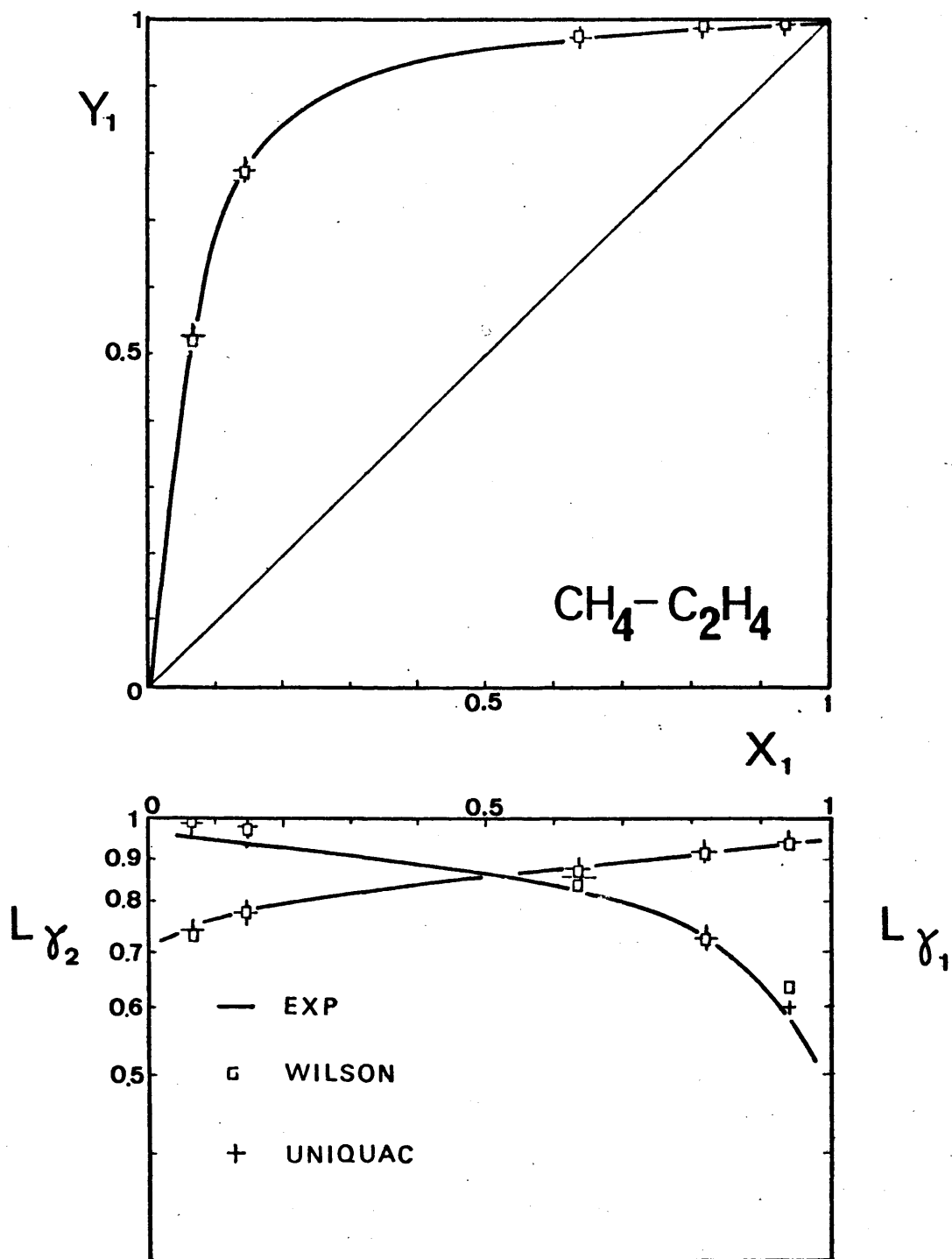


FIGURA 6-18

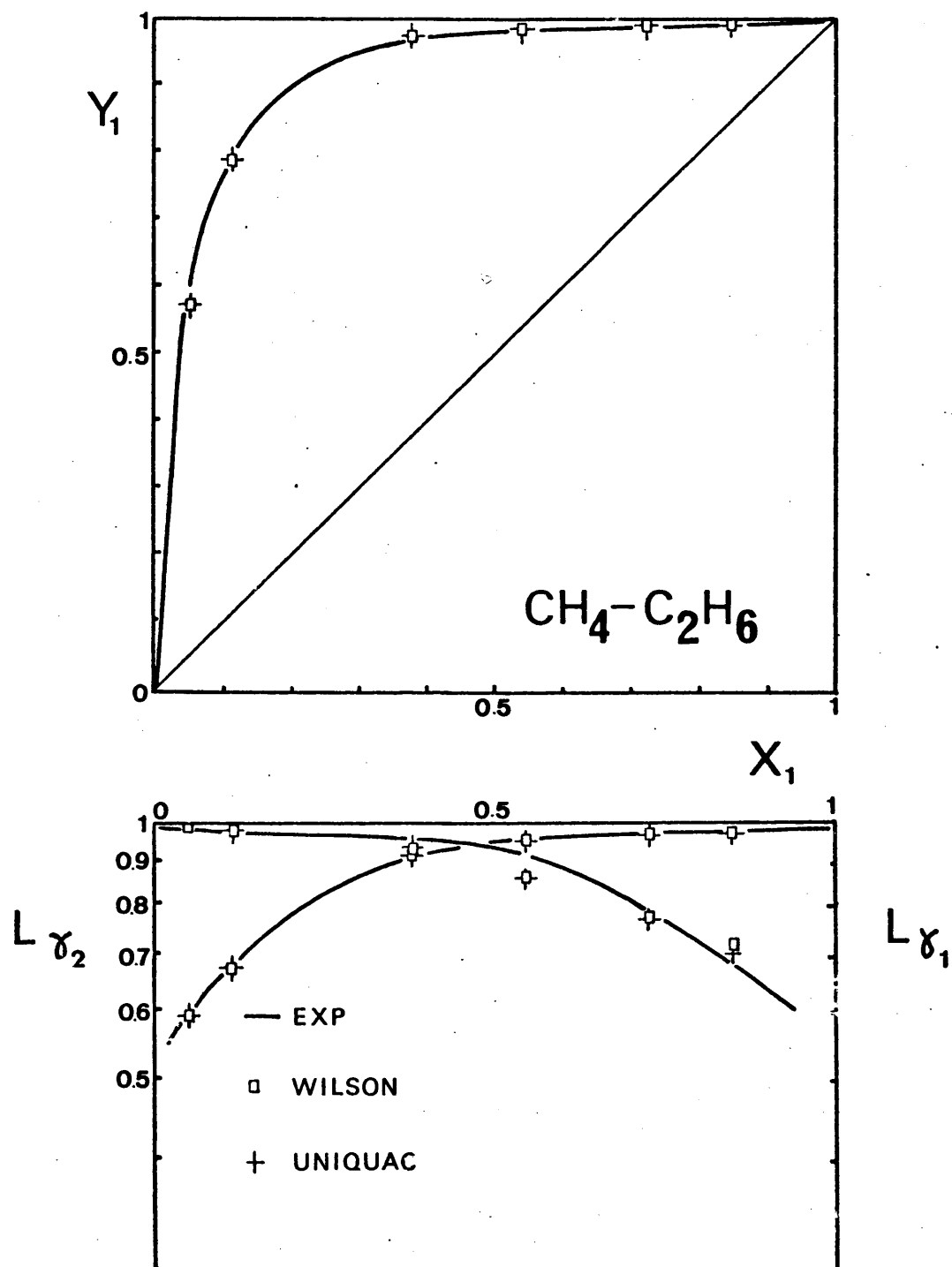


FIGURA 6-19

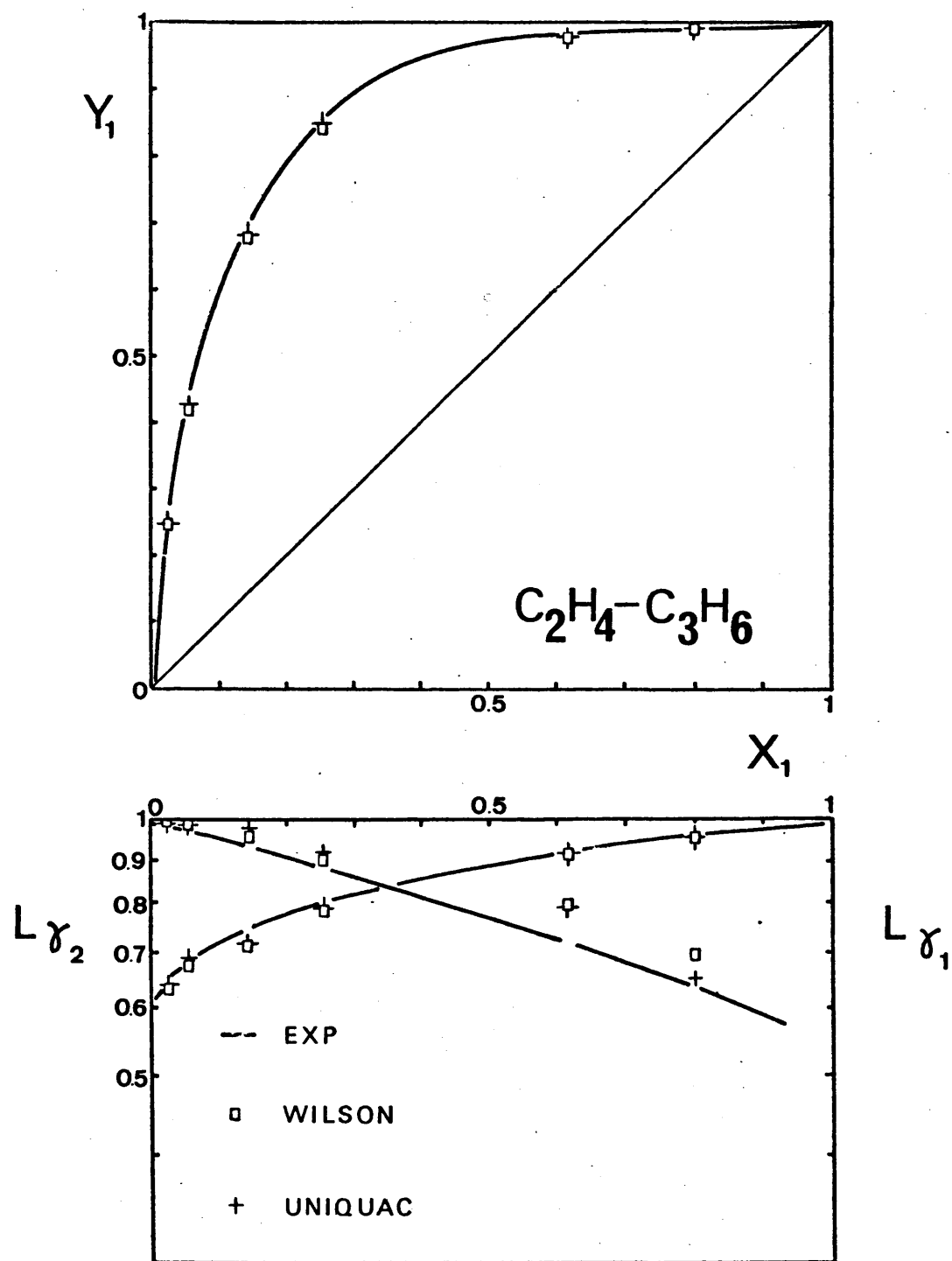


FIGURA 6-20

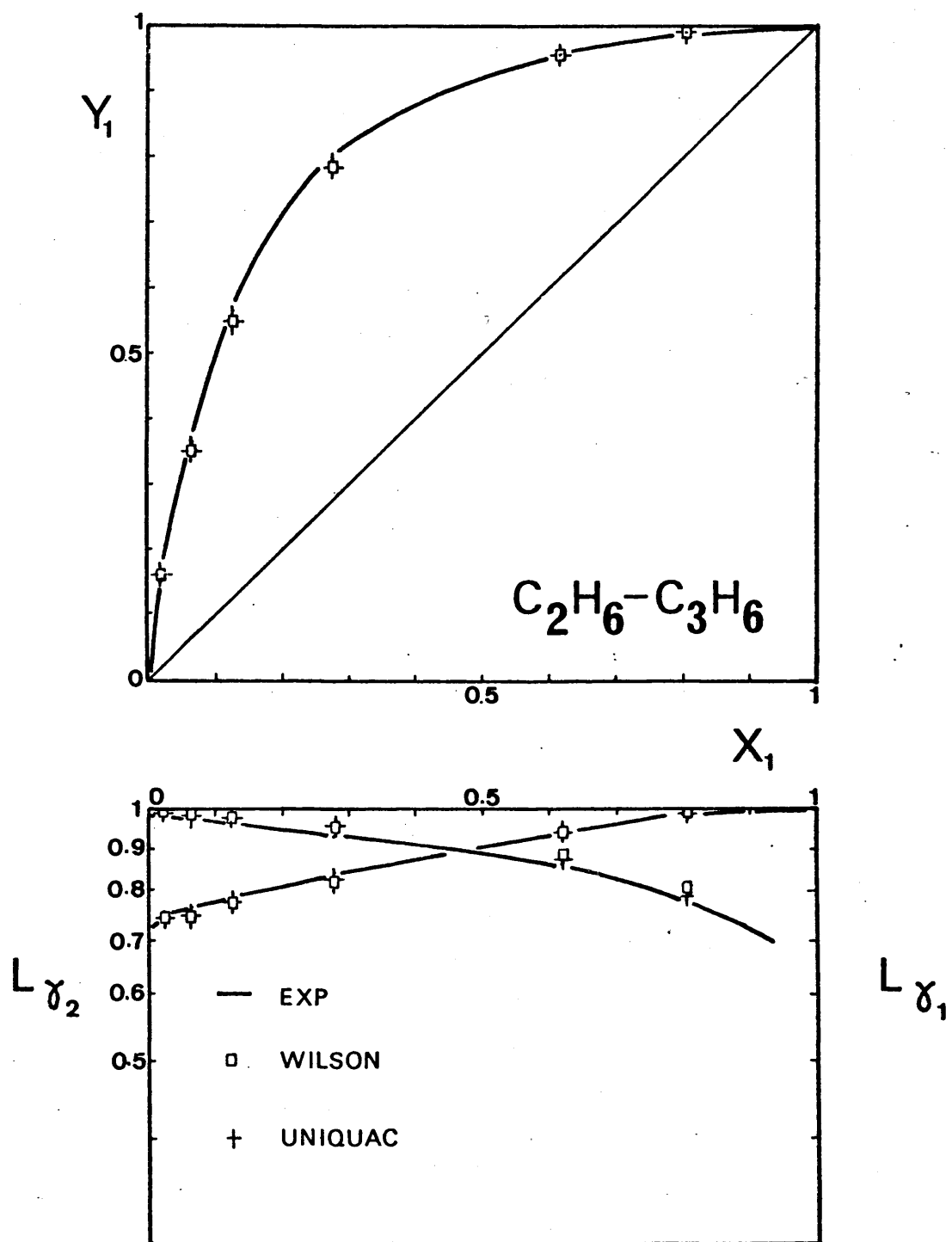


FIGURA 6-21

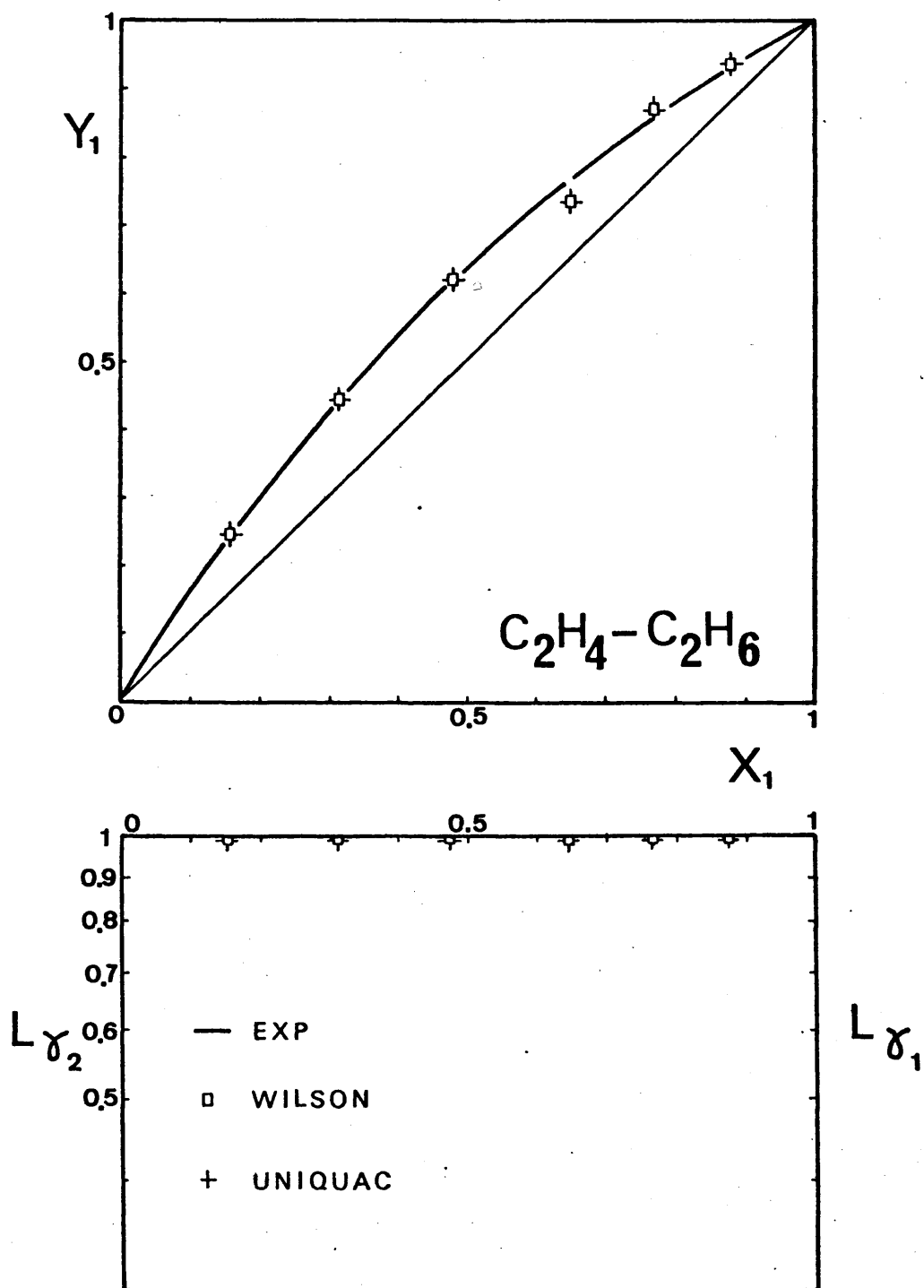


FIGURA 6-22

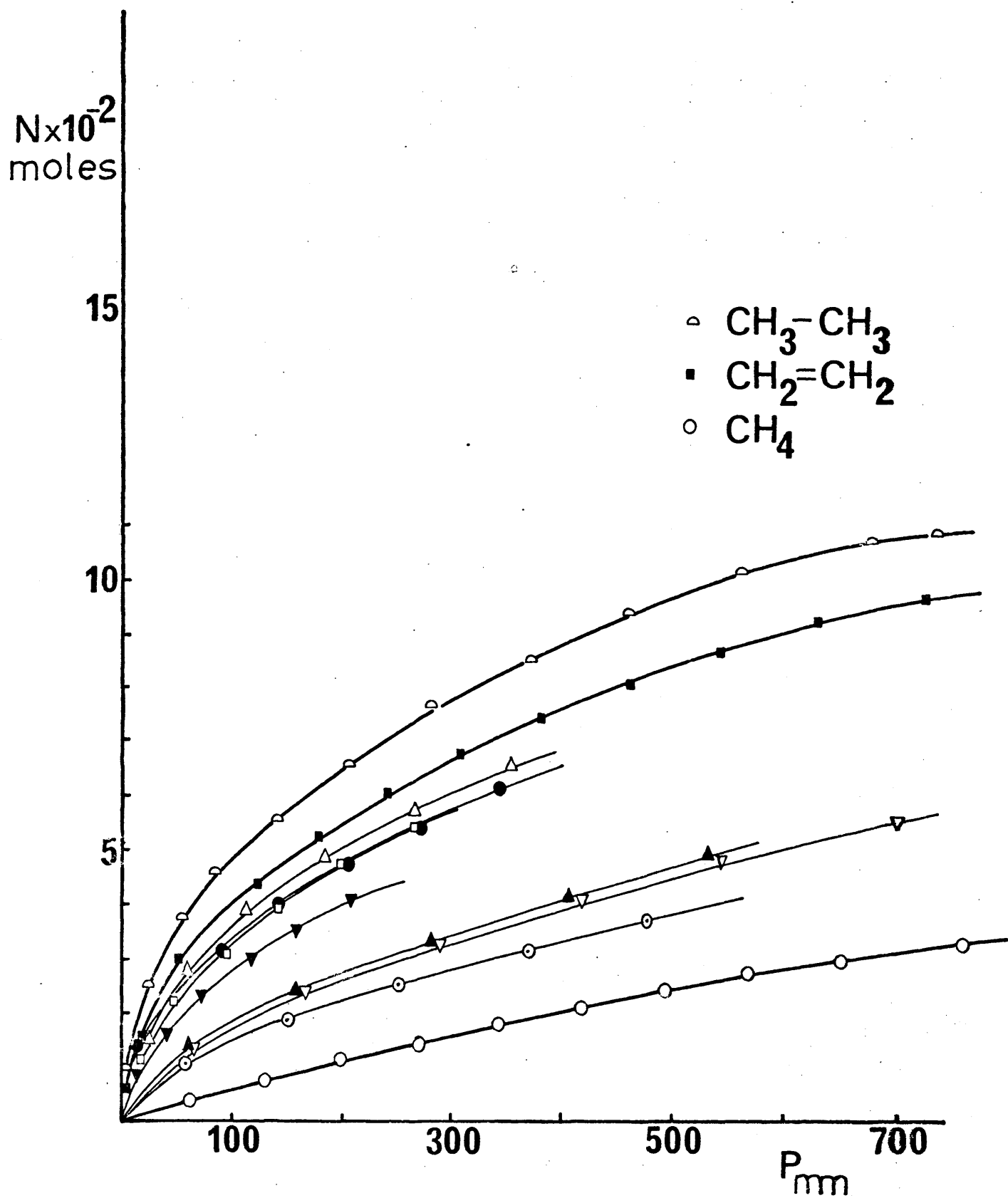


FIGURA 6-23

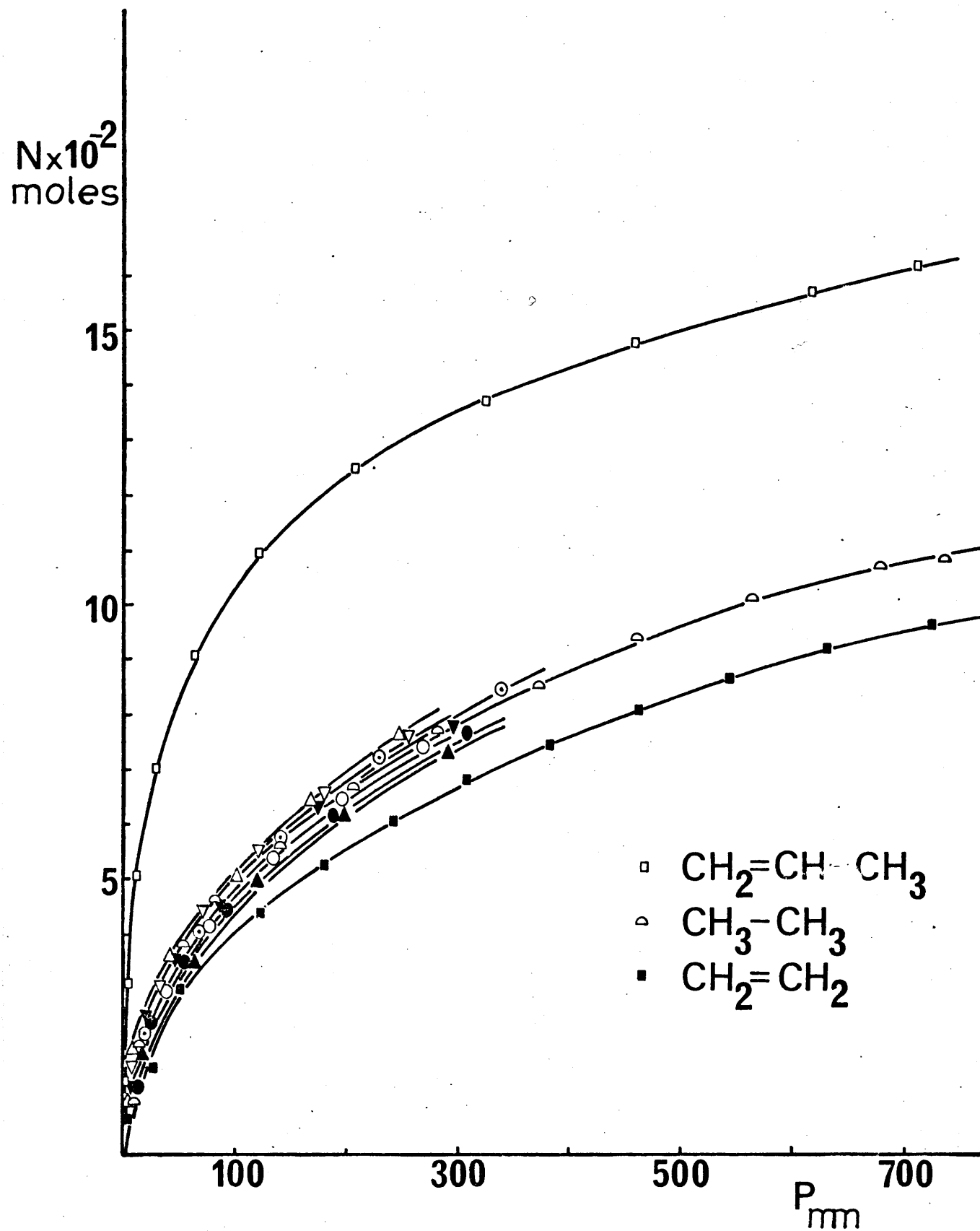


FIGURA 6-24

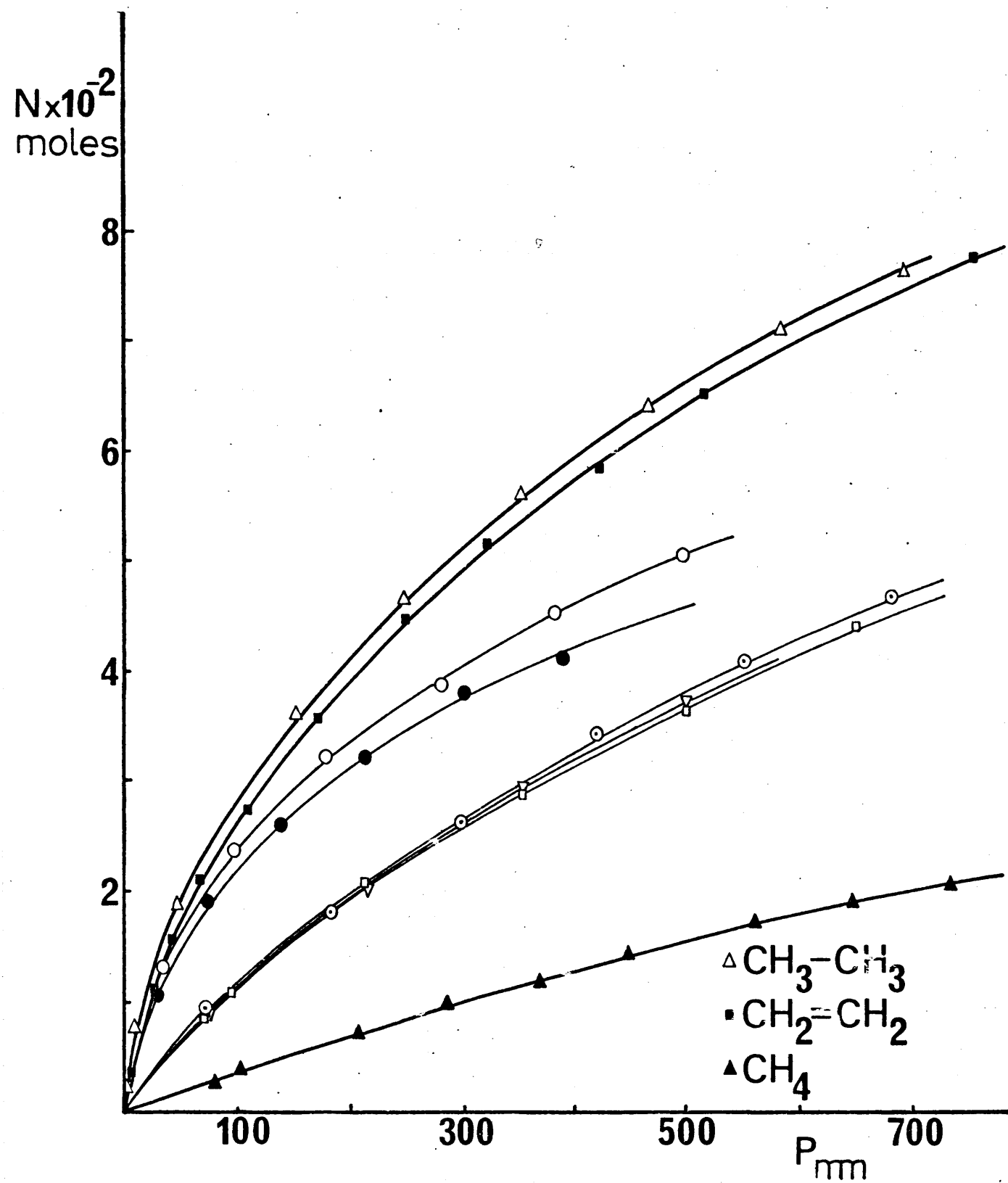


FIGURA 6-25



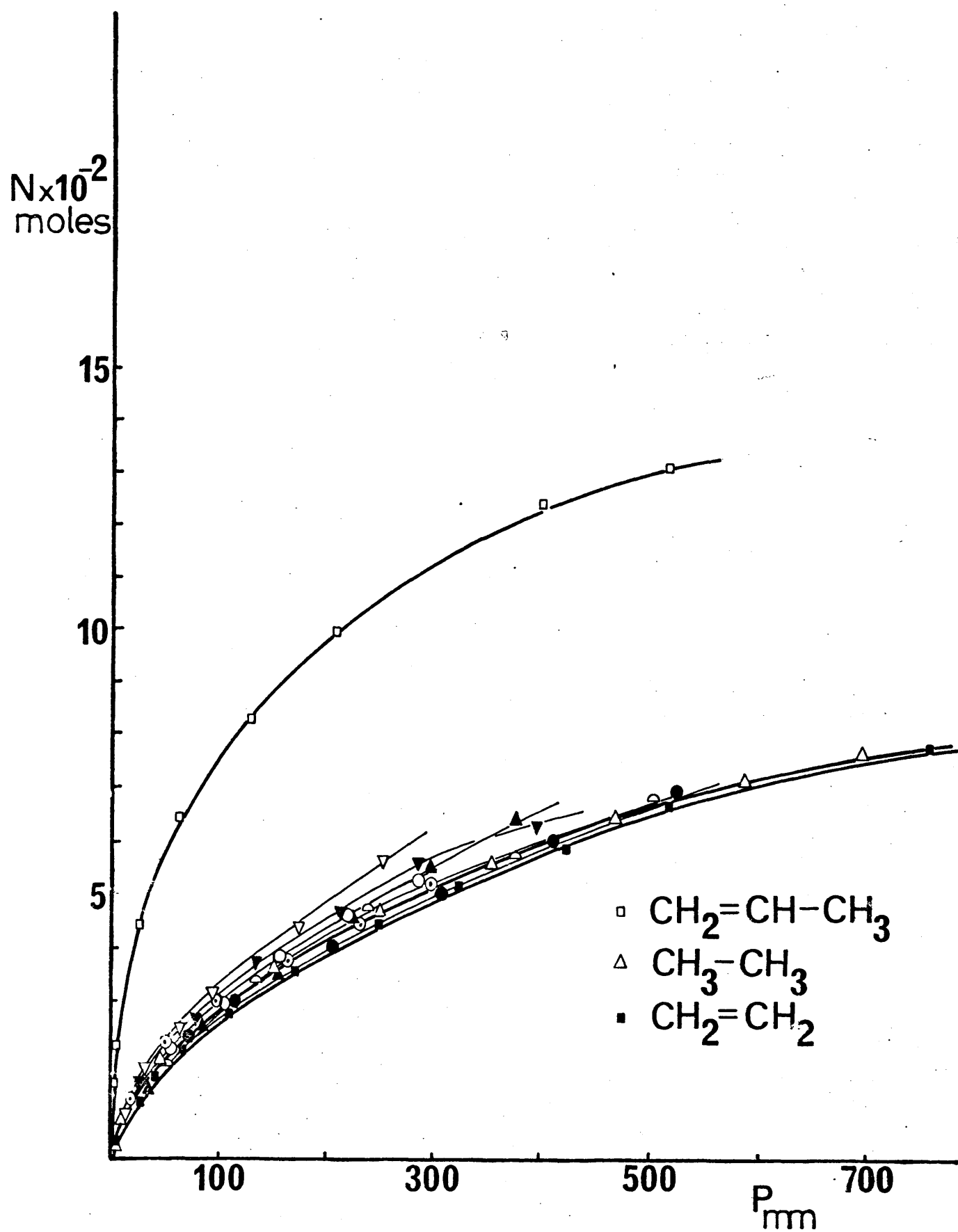


FIGURA 6-26

TABLA 6-5

Mezcla: Metano ( $M^+$ )-Etileno ( $E^+$ )

$x_1$	$y_1$	$\frac{y_1 y_2 A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$	$x_1$	$y_1$	$\frac{y_1 y_2 A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$
P=75mm. T=20°C					P=100mm. T=20°C				
0.939	0.993	6.010 $10^{-3}$	85.0	4.2	0.936	0.997	8.038 $10^{-3}$	110	6.0
0.818	0.991	7.008 $10^{-3}$	99.0	5.0	0.813	0.990	8.861 $10^{-3}$	127	6.3
0.632	0.974	9.088 $10^{-3}$	132.0	6.5	0.626	0.971	1.150 $10^{-2}$	165	8.6
0.144	0.787	2.900 $10^{-2}$	520.0	20.0	0.445	0.949	1.518 $10^{-2}$	230	10.0
0.063	0.539	4.252 $10^{-2}$	844.3	38.4	0.140	0.765	3.450 $10^{-2}$	620	28.5
P=75mm. T=50°C					0.060	0.514	4.960 $10^{-2}$	1019	53.0
0.889	0.994	3.170 $10^{-3}$	85.6	5.0					
0.688	0.978	4.104 $10^{-3}$	109.3	6.2					
0.364	0.908	6.830 $10^{-3}$	195.0	11.7					
0.123	0.664	1.505 $10^{-2}$	448.9	29.3					
0.052	0.423	2.101 $10^{-2}$	670.0	46.1					

TABLA 6.6

Mezcla: Metano ( $M^+$ )-Etano ( $E^-$ )

$x_1$	$y_1$	$\frac{\Pi y_1 y_2^A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$	$x_1$	$y_1$	$\frac{\Pi y_1 y_2^A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$
<div> <div> <div>P=75mm.</div> <div>T=20°C</div> </div> <div> <div>P=75mm.</div> <div>T=50°C</div> </div> </div>									
0.848	0.998	$6.370 \cdot 10^{-3}$	90.0	1.15	0.853	0.998	$8.186 \cdot 10^{-3}$	118.0	1.8
0.728	0.996	$7.373 \cdot 10^{-3}$	105.0	1.38	0.730	0.996	$9.995 \cdot 10^{-3}$	140.0	2.1
0.546	0.987	$9.999 \cdot 10^{-3}$	141.2	2.31	0.544	0.985	$1.380 \cdot 10^{-2}$	205.0	4.1
0.380	0.975	$1.364 \cdot 10^{-2}$	204.0	3.15	0.316	0.950	$2.228 \cdot 10^{-2}$	380.6	8.2
0.116	0.790	$4.050 \cdot 10^{-2}$	755.0	18.20	0.114	0.780	$4.728 \cdot 10^{-2}$	974.4	26.5
0.051	0.580	$5.450 \cdot 10^{-2}$	1421.6	33.50	0.048	0.555	$6.663 \cdot 10^{-2}$	1765.3	48.7
0.860	0.998	$3.301 \cdot 10^{-3}$	87.9	1.37					
0.673	0.990	$4.250 \cdot 10^{-3}$	113.5	2.59					
0.465	0.975	$6.798 \cdot 10^{-3}$	165.5	3.69					
0.235	0.923	$1.131 \cdot 10^{-2}$	323.7	7.71					
0.110	0.769	$2.098 \cdot 10^{-2}$	639.4	19.78					
0.030	0.371	$3.150 \cdot 10^{-2}$	1200.5	49.05					

TABLA 6.7

Mezcla: Etileno ( $E^+$ )-Etano ( $E^-$ )

$x_1$	$y_1$	$\frac{py_1y_2^A}{RT}$	$p_1^0$	$p_2^0$	$x_1$	$y_1$	$\frac{py_1y_2^A}{RT}$	$p_1^0$	$p_2^0$
<div> <div> <div>P=75mm.</div> <div>T=20°C</div> </div> <div> <div>P=100mm.</div> <div>T=20°C</div> </div> </div>									
0.880	0.931	6.382 $10^{-2}$	80.0	44.0	0.880	0.928	7.614 $10^{-2}$	107.0	60.5
0.770	0.857	6.640 $10^{-2}$	85.0	48.5	0.786	0.857	7.784 $10^{-2}$	110.5	65.5
0.649	0.762	6.924 $10^{-2}$	89.5	51.3	0.647	0.758	8.060 $10^{-2}$	118.5	69.0
0.478	0.620	7.224 $10^{-2}$	97.5	56.7	0.476	0.614	8.347 $10^{-2}$	129.5	74.0
0.314	0.444	7.584 $10^{-2}$	106.9	60.0	0.311	0.441	8.747 $10^{-2}$	141.9	81.5
0.153	0.243	7.967 $10^{-2}$	118.0	67.5	0.151	0.241	9.187 $10^{-2}$	159.0	89.5
<div> <div> <div>P=75mm.</div> <div>T=50°C</div> </div> </div>									
0.734	0.805	3.239 $10^{-2}$	81.0	52.1					
0.594	0.690	3.345 $10^{-2}$	86.0	56.1					
0.450	0.555	3.515 $10^{-2}$	92.1	60.0					
0.321	0.400	3.648 $10^{-2}$	95.0	65.0					
0.122	0.164	3.810 $10^{-2}$	101.1	71.2					

TABLA 6.8

Mezcla: Etileno ( $E^{\bar{}}$ )-Propileno ( $P^{\bar{}}$ )

$x_1$	$y_1$	$\frac{\pi y_1 y_2^A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$	$x_1$	$y_1$	$\frac{\pi y_1 y_2^A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$
<div> <div> <div>P=75mm.</div> <div>T=20°C</div> </div> <div> <div>P=100mm.</div> <div>T=20°C</div> </div> </div>									
0.800	0.993	7.200 $10^{-2}$	97.0	4.0	0.795	0.993	8.217 $10^{-2}$	125.0	5.0
0.614	0.980	8.426 $10^{-2}$	130.2	5.4	0.602	0.972	9.905 $10^{-2}$	175.5	8.8
0.253	0.858	1.352 $10^{-1}$	319.5	16.5	0.248	0.845	1.530 $10^{-1}$	420.0	22.5
0.141	0.696	1.701 $10^{-1}$	505.0	28.5	0.134	0.679	1.931 $10^{-1}$	665.0	39.0
0.055	0.436	2.072 $10^{-1}$	847.7	46.0	0.053	0.405	2.349 $10^{-1}$	1091.6	63.5
0.028	0.248	2.271 $10^{-1}$	1024.8	58.5	0.026	0.230	2.547 $10^{-1}$	1310.5	79.5
<div> <div> <div>P=75mm.</div> <div>T=50°C</div> </div> </div>									
0.775	0.989	3.778 $10^{-2}$	100.0	5.25					
0.632	0.976	4.298 $10^{-2}$	124.5	6.70					
0.532	0.957	4.895 $10^{-2}$	149.0	8.90					
0.342	0.894	6.315 $10^{-2}$	225.1	14.25					
0.203	0.750	8.413 $10^{-2}$	342.1	25.40					
0.145	0.657	9.393 $10^{-2}$	448.3	31.50					
0.045	0.348	1.207 $10^{-1}$	860.0	52.00					

TABLA 6.9

Meclo: Etano (E)-Propileno (P)

$x_1$	$y_1$	$\frac{\pi y_1 y_2^A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$	$x_1$	$y_1$	$\frac{\pi y_1 y_2^A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$
P=75mm. T=20°C					P=100mm. T=20°C				
0.807	0.989	9.210 10 <sup>-2</sup>	92.0	5.5	0.804	0.986	1.087 10 <sup>-1</sup>	124.5	9.2
0.619	0.954	1.081 10 <sup>-1</sup>	123.0	10.5	0.613	0.951	1.263 10 <sup>-1</sup>	170.0	15.0
0.277	0.798	1.536 10 <sup>-1</sup>	257.0	23.5	0.270	0.781	1.766 10 <sup>-1</sup>	352.5	31.7
0.126	0.565	1.922 10 <sup>-1</sup>	424.5	38.8	0.122	0.540	2.188 10 <sup>-1</sup>	579.0	53.5
0.064	0.363	2.156 10 <sup>-1</sup>	557.0	51.9	0.062	0.337	2.436 10 <sup>-1</sup>	803.0	71.4
0.021	0.156	2.348 10 <sup>-1</sup>	735.0	63.9	0.020	0.144	2.627 10 <sup>-1</sup>	1180.3	87.5
P=75mm. T=50°C									
0.846	0.992	4.450 10 <sup>-2</sup>	91.0	7.2					
0.551	0.939	6.181 10 <sup>-2</sup>	161.0	13.8					
0.452	0.906	6.806 10 <sup>-2</sup>	194.0	16.7					
0.382	0.846	7.744 10 <sup>-2</sup>	237.0	21.5					
0.225	0.693	9.474 10 <sup>-2</sup>	378.7	31.9					
0.156	0.595	1.032 10 <sup>-1</sup>	493.2	38.2					
0.083	0.405	1.178 10 <sup>-1</sup>	731.9	50.2					
0.058	0.274	1.264 10 <sup>-1</sup>	859.9	57.9					

TABLA 6-10 Mezcla: Metano (M<sup>-</sup>)-Etileno (E<sup>-</sup>)

Valores experimentales				Ec. de Wilson				Ec. UNIQUAC			
$x_1$	$y_1$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	$y_1^w$	$y_1 - y_1^w$	$y_1$	$y_2$	$y_1^U$	$y_1 - y_1^U$
T=20°C P=75mm.				$\Lambda_{12} = -1.00 \cdot 10^{-2}$				$\tau_{12} = 3.43 \cdot 10^{-1}$			
0.939	0.998	0.938	0.585	0.938	0.640	0.998	0.000	0.940	0.592	0.998	0.000
0.818	0.991	0.918	0.742	0.918	0.726	0.991	0.000	0.917	0.729	0.990	0.001
0.632	0.974	0.876	0.815	0.875	0.839	0.973	0.001	0.873	0.860	0.972	0.002
0.144	0.787	0.788	0.933	0.775	0.989	0.773	0.014	0.776	0.986	0.775	0.012
0.063	0.539	0.760	0.961	0.735	0.990	0.521	0.018	0.740	0.991	0.525	0.014
T=20°C P=100mm.				$\Lambda_{12} = -2.00 \cdot 10^{-2}$				$\tau_{12} = 5.36 \cdot 10^{-1}$			
0.936	0.997	0.969	0.651	0.968	0.752	0.997	0.000	0.967	0.705	0.996	0.001
0.813	0.990	0.959	0.849	0.959	0.813	0.990	0.000	0.956	0.805	0.991	0.001
0.626	0.971	0.940	0.902	0.940	0.890	0.971	0.000	0.940	0.907	0.971	0.000
0.445	0.949	0.927	0.919	0.926	0.945	0.948	0.001	0.925	0.951	0.947	0.002
0.140	0.765	0.881	0.959	0.871	0.990	0.756	0.010	0.873	0.987	0.758	0.007
0.060	0.514	0.840	0.976	0.822	0.998	0.502	0.012	0.822	0.998	0.503	0.011
T=50°C P=75mm.				$\Lambda_{12} = -1.00 \cdot 10^{-1}$				$\tau_{12} = 3.34 \cdot 10^{-1}$			
0.889	0.994	0.980	0.811	0.979	0.857	0.994	0.014	0.979	0.848	0.994	0.000
0.688	0.978	0.975	0.872	0.974	0.912	0.976	0.001	0.974	0.912	0.976	0.002
0.364	0.908	0.959	0.928	0.954	0.964	0.903	0.005	0.955	0.970	0.904	0.004
0.123	0.664	0.902	0.980	0.894	0.989	0.658	0.006	0.897	0.994	0.660	0.004
0.052	0.423	0.910	0.990	0.899	0.999	0.418	0.005	0.900	0.999	0.418	0.005

TABLA 6-11

Mezcla: Metano (M<sup>-</sup>)-Etano (E<sup>-</sup>)

Valores experimentales				Ec. de Wilson				Ec. UNIQUAC $\left\{ \begin{matrix} r_1=1.128 & s_1=1.156 \\ r_2=1.802 & s_2=1.696 \end{matrix} \right.$			
$x_1$	$y_1$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	$y_1^w$	$y_1^w - y_1$	$y_1$	$y_2$	$y_1^u$	$y_1^u - y_1$
T=20°C P=75mm.				$\Lambda_{12} = -5.11 \cdot 10^{-1}$				$\tau_{12} = 2.19$			
0.848	0.998	0.981	0.770	0.981	0.725	0.998	0.000	0.980	0.708	0.998	0.000
0.728	0.996	0.977	0.799	0.977	0.780	0.996	0.000	0.976	0.774	0.996	0.000
0.546	0.987	0.960	0.930	0.961	0.861	0.988	0.001	0.960	0.863	0.988	0.001
0.380	0.975	0.943	0.960	0.944	0.925	0.976	0.001	0.943	0.930	0.976	0.001
0.116	0.970	0.677	0.980	0.674	0.990	0.787	0.003	0.675	0.993	0.787	0.003
0.051	0.580	0.600	0.990	0.597	0.997	0.577	0.003	0.597	0.999	0.577	0.003
T=20°C P=100mm.				$\Lambda_{12} = -4.34 \cdot 10^{-2}$				$\tau_{12} = 7.17 \cdot 10^{-2}$			
0.853	0.998	0.993	0.601	0.992	0.645	0.998	0.000	0.992	0.603	0.998	0.000
0.730	0.996	0.972	0.700	0.974	0.739	0.996	0.000	0.974	0.731	0.996	0.000
0.544	0.985	0.879	0.802	0.882	0.857	0.984	0.001	0.881	0.859	0.984	0.001
0.316	0.950	0.790	0.885	0.787	0.924	0.946	0.004	0.786	0.949	0.945	0.005
0.114	0.780	0.700	0.937	0.690	0.989	0.767	0.013	0.692	0.987	0.768	0.012
0.048	0.555	0.655	0.960	0.634	0.998	0.537	0.018	0.639	0.991	0.541	0.014
T=50°C P=75mm.				$\Lambda_{12} = -1.00 \cdot 10^{-1}$				$\tau_{12} = 2.55 \cdot 10^{-1}$			
0.860	0.998	0.990	0.780	0.990	0.819	0.998	0.000	0.990	0.798	0.998	0.000
0.673	0.990	0.972	0.885	0.972	0.886	0.990	0.000	0.972	0.882	0.990	0.000
0.465	0.975	0.950	0.950	0.950	0.945	0.975	0.000	0.950	0.952	0.975	0.000
0.235	0.923	0.911	0.979	0.910	0.986	0.922	0.001	0.910	0.989	0.922	0.001
0.110	0.769	0.820	0.984	0.817	0.991	0.766	0.003	0.818	0.994	0.767	0.002
0.030	0.371	0.770	0.993	0.762	0.999	0.366	0.005	0.763	0.999	0.366	0.005



TABLA 6-12 Mezcla: Etileno (E <sup>+</sup> )-Etano (E <sup>-</sup> )									
Valores Experimentales				Ec. de Wilson			Ec. UNIQUAC		
x <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	γ <sub>1</sub>	γ <sub>2</sub>	y <sub>1</sub> <sup>w</sup> y <sub>1</sub>	γ <sub>1</sub>	γ <sub>2</sub>	y <sub>1</sub> <sup>U</sup> y <sub>1</sub> -y <sub>1</sub>
T=20°C P=75mm.				Λ <sub>12</sub> =0 Λ <sub>21</sub> =0			τ <sub>12</sub> =1.105 τ <sub>21</sub> =8.949 10		
0.880	0.931	0.992	0.980	1.000	1.000	0.939	1.000	1.000	0.939
0.770	0.857	0.982	0.961	1.000	1.000	0.783	1.000	1.000	0.873
0.649	0.762	0.984	0.991	1.000	1.000	0.731	1.000	1.000	0.731
0.478	0.620	0.998	0.963	1.000	1.000	0.621	1.000	1.000	0.621
0.314	0.444	0.992	1.012	1.000	1.000	0.448	1.000	1.000	0.448
0.153	0.243	1.009	0.993	1.000	1.000	0.241	1.000	1.000	0.241
T=20°C P=100mm.				Λ <sub>12</sub> =0 Λ <sub>21</sub> =0			τ <sub>12</sub> =1.105 τ <sub>21</sub> =8.949 10		
0.880	0.928	0.986	0.992	1.000	1.000	0.942	1.000	1.000	0.942
0.786	0.857	0.987	1.020	1.000	1.000	0.868	1.000	1.000	0.868
0.647	0.758	0.989	0.994	1.000	1.000	0.767	1.000	1.000	0.767
0.476	0.614	0.996	0.995	1.000	1.000	0.616	1.000	1.000	0.616
0.311	0.441	0.999	0.995	1.000	1.000	0.441	1.000	1.000	0.441
0.151	0.241	1.004	0.999	1.000	1.000	0.240	1.000	1.000	0.240
T=50°C P=75mm.				Λ <sub>12</sub> =0 Λ <sub>21</sub> =0			τ <sub>12</sub> =1.105 τ <sub>21</sub> =8.949 10		
0.734	0.805	1.013	1.054	1.000	1.000	0.799	1.000	1.000	0.799
0.594	0.690	1.011	1.021	1.000	1.000	0.681	1.000	1.000	0.681
0.450	0.555	1.004	1.011	1.000	1.000	0.553	1.000	1.000	0.553
0.321	0.400	0.985	1.020	1.000	1.000	0.407	1.000	1.000	0.407
0.122	0.164	0.997	1.003	1.000	1.000	0.164	1.000	1.000	0.164

TABLA 6-13 Mezcla: Etileno (E <sup>+</sup> )-Propileno (P <sup>-</sup> )									
Valores experimentales				Ec. de Wilson				Ec. UNIQUAC	
x <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>1</sub> <sup>w</sup>	y <sub>1</sub> -y <sub>1</sub> <sup>w</sup>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>
T=20°C P=75mm.				Λ <sub>12</sub> = -1.00 10 <sup>-2</sup> Λ <sub>21</sub> = -5.81 10 <sup>-1</sup>				τ <sub>12</sub> = 5.49 10 <sup>-2</sup> τ <sub>21</sub> = 3.30	
0.800	0.993	0.960	0.650	0.959	0.702	0.992	0.001	0.960	0.652
0.614	0.980	0.919	0.720	0.916	0.803	0.977	0.003	0.917	0.796
0.253	0.858	0.796	0.864	0.779	0.904	0.840	0.018	0.788	0.919
0.141	0.696	0.733	0.931	0.712	0.971	0.676	0.020	0.716	0.980
0.055	0.436	0.695	0.974	0.677	0.990	0.421	0.015	0.684	0.993
0.028	0.248	0.660	0.991	0.633	0.999	0.242	0.006	0.639	0.999
T=20°C P=100mm.				Λ <sub>12</sub> = -1.20 10 <sup>-2</sup> Λ <sub>21</sub> = -5.01 10 <sup>-1</sup>				τ <sub>12</sub> = 7.21 10 <sup>-2</sup> τ <sub>21</sub> = 3.16	
0.795	0.993	0.999	0.683	0.999	0.725	0.992	0.001	0.999	0.688
0.602	0.972	0.920	0.799	0.918	0.856	0.970	0.002	0.919	0.829
0.248	0.845	0.811	0.916	0.801	0.966	0.835	0.010	0.804	0.971
0.134	0.679	0.762	0.950	0.745	0.984	0.664	0.015	0.751	0.985
0.053	0.405	0.700	0.989	0.690	0.991	0.399	0.006	0.694	0.995
0.026	0.230	0.675	0.994	0.662	0.999	0.226	0.004	0.665	0.999
T=50°C P=75mm.				Λ <sub>12</sub> = -4.19 10 <sup>-1</sup> Λ <sub>21</sub> = -1.00 10 <sup>-1</sup>				τ <sub>12</sub> = 3.24 10 <sup>-2</sup> τ <sub>21</sub> = 3.32	
0.775	0.989	0.958	0.679	0.956	0.712	0.988	0.001	0.957	0.674
0.632	0.976	0.930	0.730	0.927	0.792	0.973	0.003	0.928	0.799
0.532	0.957	0.905	0.774	0.901	0.827	0.952	0.005	0.901	0.852
0.342	0.894	0.871	0.848	0.860	0.909	0.883	0.011	0.863	0.917
0.203	0.750	0.810	0.926	0.795	0.957	0.736	0.014	0.798	0.970
0.145	0.657	0.758	0.955	0.744	0.980	0.645	0.012	0.749	0.984
0.045	0.348	0.674	0.982	0.656	0.998	0.339	0.009	0.660	0.998

$r_1 = 1.574$   $s_1 = 1.488$   
 $r_2 = 2.247$   $s_2 = 2.024$

$U$   
 $y_1 - y_1$

$U$   
 $y_1 - y_1$

$U$   
 $y_1 - y_1$

$U$   
 $y_1 - y_1$

$U$   
 $y_1 - y_1$

$U$   
 $y_1 - y_1$

$U$   
 $y_1 - y_1$

$U$   
 $y_1 - y_1$

TABLA 6-14

Mezcla: Etano (E<sup>-</sup>)-Propileno (P<sup>=</sup>)

Valores experimentales				Ec. de Wilson				Ec. UNIQUAC			
$x_1$	$y_1$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	$y_1^w$	$y_1^w - y_1^w$	$y_1$	$y_2$	$y_1^u$	$y_1^u - y_1^u$
T=20°C				P=75mm.				$\tau_{12}=2.14 \cdot 10^{-1}$ $\tau_{21}=2.58$			
0.807	0.989	0.999	0.780	0.999	0.805	0.989	0.000	0.999	0.784	0.989	0.000
0.619	0.954	0.940	0.865	0.939	0.885	0.953	0.001	0.940	0.875	0.953	0.001
0.277	0.798	0.841	0.930	0.820	0.958	0.779	0.019	0.823	0.969	0.780	0.018
0.126	0.565	0.792	0.962	0.771	0.985	0.550	0.015	0.776	0.990	0.553	0.012
0.064	0.363	0.763	0.984	0.743	0.995	0.353	0.010	0.748	0.997	0.355	0.008
0.021	0.156	0.758	0.999	0.742	0.999	0.166	0.010	0.742	0.999	0.166	0.010
T=20°C				P=100mm.				$\tau_{12}=1.31 \cdot 10^{-1}$ $\tau_{21}=2.98$			
0.804	0.986	0.985	0.776	0.985	0.768	0.986	0.000	0.986	0.712	0.987	0.001
0.613	0.951	0.913	0.844	0.912	0.849	0.951	0.000	0.913	0.834	0.952	0.001
0.270	0.781	0.821	0.946	0.816	0.960	0.777	0.004	0.817	0.966	0.776	0.005
0.122	0.540	0.764	0.980	0.756	0.989	0.534	0.006	0.760	0.990	0.536	0.004
0.062	0.337	0.677	0.990	0.666	0.997	0.332	0.005	0.669	0.996	0.333	0.004
0.020	0.144	0.610	0.998	0.606	0.999	0.143	0.001	0.607	0.999	0.143	0.001
T=50°C				P=75mm.				$\tau_{12}=7.66 \cdot 10^{-2}$ $\tau_{21}=3.79$			
0.846	0.992	0.966	0.536	0.966	0.540	0.992	0.000	0.967	0.483	0.993	0.001
0.551	0.939	0.794	0.738	0.792	0.759	0.937	0.002	0.791	0.786	0.935	0.004
0.452	0.906	0.775	0.771	0.769	0.817	0.899	0.007	0.766	0.852	0.896	0.010
0.382	0.846	0.701	0.871	0.700	0.870	0.846	0.000	0.695	0.912	0.838	0.008
0.225	0.693	0.610	0.931	0.604	0.941	0.687	0.006	0.600	0.967	0.681	0.012
0.156	0.595	0.580	0.942	0.566	0.969	0.581	0.014	0.564	0.980	0.579	0.016
0.083	0.405	0.500	0.969	0.482	0.990	0.391	0.014	0.480	0.997	0.388	0.017
0.058	0.274	0.412	0.998	0.414	0.996	0.275	0.001	0.412	0.999	0.274	0.000

TABLA 6.15

MEZCLA: METANO - ETILENO - ETANO EC. WILSON

1 <sup>o</sup>	2 <sup>o</sup>	3 <sup>o</sup>	4 <sup>o</sup>	5 <sup>o</sup>	6 <sup>o</sup>	7 <sup>o</sup>	8 <sup>o</sup>	9 <sup>o</sup>	10 <sup>o</sup>	11 <sup>o</sup>	12 <sup>o</sup>	13 <sup>o</sup>	14 <sup>o</sup>	15 <sup>o</sup>	16 <sup>o</sup>	17 <sup>o</sup>	18 <sup>o</sup>
x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	$\frac{A y_1 y_2 y_3}{RT}$	P <sub>1</sub> <sup>o</sup> (mm)	P <sub>2</sub> <sup>o</sup> (mm)	P <sub>3</sub> <sup>o</sup> (mm)	y <sub>1</sub> <sup>w</sup>	y <sub>2</sub> <sup>w</sup>	y <sub>3</sub> <sup>w</sup>	y <sub>1</sub> -y <sub>1</sub> <sup>w</sup>	y <sub>2</sub> -y <sub>2</sub> <sup>w</sup>
<b>T = 20 °C</b>																	
<b>P = 75 mm</b>																	
0.161	0.417	0.422	0.790	0.113	0.080	0.713	0.992	0.981	2.978 10 <sup>-2</sup>	531.9	21.2	12.3	0.814	0.117	0.068	0.024	0.004
0.376	0.309	0.315	0.950	0.033	0.015	0.832	0.937	0.928	1.509 10 <sup>-2</sup>	226.7	9.9	4.3	0.946	0.038	0.017	0.004	0.003
0.276	0.239	0.484	0.921	0.033	0.046	0.782	0.965	0.959	1.974 10 <sup>-2</sup>	319.9	13.8	6.1	0.920	0.043	0.038	0.001	0.010
0.275	0.480	0.244	0.899	0.085	0.016	0.780	0.972	0.954	1.940 10 <sup>-2</sup>	313.5	13.5	5.8	0.897	0.084	0.018	0.002	0.001
0.113	0.582	0.305	0.685	0.250	0.065	0.689	0.998	0.986	3.680 10 <sup>-2</sup>	668.1	31.3	16.2	0.694	0.243	0.065	0.009	0.007
0.113	0.293	0.594	0.710	0.138	0.152	0.679	0.996	0.991	3.880 10 <sup>-2</sup>	715.1	33.8	17.3	0.732	0.132	0.136	0.022	0.006
0.091	0.445	0.464	0.633	0.230	0.137	0.669	0.998	0.992	4.176 10 <sup>-2</sup>	804.8	37.5	20.1	0.653	0.222	0.124	0.020	0.008
<b>T = 20 °C</b>																	
<b>P = 100 mm</b>																	
0.143	0.429	0.429	0.770	0.153	0.076	0.728	0.998	0.975	3.990 10 <sup>-2</sup>	740.9	35.2	17.9	0.772	0.152	0.075	0.002	0.001
0.347	0.324	0.329	0.940	0.048	0.022	0.821	0.998	0.914	2.015 10 <sup>-2</sup>	327.5	14.2	6.4	0.934	0.046	0.019	0.006	0.002
0.247	0.249	0.504	0.900	0.045	0.055	0.758	0.995	0.957	2.792 10 <sup>-2</sup>	479.4	19.5	11.3	0.897	0.049	0.055	0.003	0.004
0.249	0.497	0.254	0.880	0.095	0.025	0.797	0.998	0.939	2.620 10 <sup>-2</sup>	444.8	18.7	10.4	0.883	0.093	0.025	0.003	0.002
0.104	0.586	0.310	0.670	0.255	0.075	0.733	0.999	0.980	4.420 10 <sup>-2</sup>	890.2	42.3	23.9	0.679	0.249	0.073	0.009	0.006
0.102	0.296	0.602	0.690	0.142	0.168	0.687	0.996	0.988	4.770 10 <sup>-2</sup>	982.5	50.3	26.9	0.689	0.148	0.162	0.001	0.006
0.082	0.447	0.471	0.626	0.228	0.146	0.699	0.999	0.988	5.030 10 <sup>-2</sup>	1076.1	54.3	29.4	0.619	0.242	0.138	0.007	0.014
<b>T = 50 °C</b>																	
<b>P = 75 mm</b>																	
0.325	0.333	0.342	0.920	0.052	0.029	0.899	0.988	0.965	8.200 10 <sup>-3</sup>	234.3	14.7	4.9	0.913	0.064	0.022	0.007	0.012
0.192	0.278	0.530	0.841	0.069	0.090	0.853	0.998	0.987	1.310 10 <sup>-2</sup>	385.6	25.4	8.9	0.842	0.094	0.062	0.001	0.025
0.197	0.520	0.283	0.815	0.151	0.034	0.867	0.996	0.983	1.220 10 <sup>-2</sup>	355.1	23.4	8.3	0.809	0.162	0.031	0.006	0.011
0.127	0.570	0.303	0.682	0.264	0.054	0.845	0.999	0.991	1.635 10 <sup>-2</sup>	489.8	33.0	11.9	0.700	0.250	0.050	0.058	0.014
0.046	0.457	0.497	0.490	0.340	0.170	0.801	0.997	0.979	2.501 10 <sup>-2</sup>	959.4	55.9	29.7	0.471	0.335	0.193	0.019	0.005

TABLA 6.16

MEZCLA: METANO - ETILENO - ETANO EC. UNIQUAC

1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>	18 <sup>a</sup>
x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	$\frac{A y_1 y_2 y_3}{RT}$	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (T)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (T)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (T)	y <sub>1</sub> <sup>U</sup>	y <sub>2</sub> <sup>U</sup>	y <sub>3</sub> <sup>U</sup>	y <sub>1</sub> -y <sub>1</sub> <sup>U</sup>	y <sub>2</sub> -y <sub>2</sub> <sup>U</sup>
<b>T=20°C</b>																	
<b>P=75mm</b>																	
0.161	0.417	0.422	0.790	0.113	0.080	0.593	0.999	0.948	3.380 10 <sup>-2</sup>	603.8	27.4	14.5	0.769	0.152	0.079	0.021	0.039
0.376	0.309	0.315	0.950	0.035	0.015	0.764	0.938	0.849	1.596 10 <sup>-2</sup>	246.4	10.6	4.4	0.943	0.041	0.016	0.007	0.006
0.276	0.239	0.484	0.921	0.033	0.046	0.688	0.918	0.942	2.155 10 <sup>-2</sup>	359.0	15.3	7.6	0.909	0.045	0.046	0.012	0.012
0.275	0.480	0.244	0.899	0.085	0.016	0.706	0.999	0.849	2.090 10 <sup>-2</sup>	341.5	14.8	7.1	0.885	0.096	0.019	0.014	0.010
0.113	0.582	0.305	0.685	0.250	0.065	0.590	0.999	0.940	3.970 10 <sup>-2</sup>	736.2	34.9	17.7	0.661	0.271	0.068	0.024	0.021
0.113	0.293	0.594	0.710	0.138	0.152	0.542	0.986	0.989	4.245 10 <sup>-2</sup>	840.7	38.3	21.2	0.687	0.148	0.166	0.023	0.010
0.091	0.445	0.464	0.633	0.230	0.137	0.534	0.999	0.975	4.480 10 <sup>-2</sup>	906.6	43.6	24.8	0.593	0.258	0.149	0.040	0.028
<b>T=20°C</b>																	
<b>P=100mm</b>																	
0.143	0.429	0.429	0.770	0.153	0.076	0.717	0.999	0.983	4.030 10 <sup>-2</sup>	750.3	35.6	18.1	0.769	0.154	0.076	0.001	0.001
0.347	0.324	0.329	0.940	0.048	0.022	0.791	0.994	0.933	2.080 10 <sup>-2</sup>	339.6	14.7	7.0	0.932	0.047	0.021	0.008	0.001
0.247	0.249	0.504	0.900	0.045	0.035	0.743	0.997	0.976	2.830 10 <sup>-2</sup>	487.1	19.7	11.5	0.894	0.049	0.057	0.006	0.004
0.249	0.497	0.254	0.880	0.095	0.025	0.772	0.999	0.941	2.680 10 <sup>-2</sup>	456.9	18.9	10.7	0.878	0.095	0.026	0.002	0.000
0.104	0.586	0.310	0.670	0.255	0.075	0.724	0.999	0.981	4.440 10 <sup>-2</sup>	895.7	42.7	24.2	0.674	0.252	0.074	0.004	0.003
0.102	0.296	0.602	0.690	0.142	0.168	0.692	0.998	0.995	4.760 10 <sup>-2</sup>	980.5	50.1	26.8	0.693	0.149	0.161	0.003	0.007
0.082	0.447	0.471	0.626	0.228	0.146	0.697	0.999	0.993	5.030 10 <sup>-2</sup>	1076.1	54.3	29.4	0.616	0.244	0.140	0.010	0.016
<b>T=50°C</b>																	
<b>P=75mm</b>																	
0.325	0.333	0.342	0.920	0.052	0.029	0.892	0.993	0.970	8.250 10 <sup>-3</sup>	235.8	14.8	5.0	0.911	0.065	0.023	0.009	0.013
0.192	0.278	0.530	0.841	0.069	0.090	0.854	0.999	0.990	1.315 10 <sup>-2</sup>	387.2	25.5	8.9	0.845	0.091	0.063	0.005	0.022
0.197	0.520	0.283	0.815	0.151	0.034	0.868	0.999	0.985	1.220 10 <sup>-2</sup>	355.1	23.4	8.3	0.809	0.160	0.031	0.006	0.009
0.127	0.570	0.303	0.682	0.264	0.034	0.852	0.999	0.992	1.630 10 <sup>-2</sup>	488.1	32.9	11.8	0.700	0.250	0.050	0.018	0.014
0.046	0.457	0.497	0.490	0.340	0.170	0.825	0.999	0.998	2.495 10 <sup>-2</sup>	944.6	54.6	28.1	0.478	0.332	0.186	0.012	0.008



TABLA 6.18

MEZCLA: ETILENO-ETANO-PROPILENO EC. UNIIQUAC

1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	15 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>	18 <sup>a</sup>
x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	$\frac{A_{23}y_1y_2y_3}{RT}$	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (π)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (π)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (π)	$\frac{U}{y_1}$	$\frac{U}{y_2}$	$\frac{U}{y_3}$	$y_1 - y_1^U$	$y_2 - y_2^U$
<b>T=20°C</b>																	
<b>P=75mm</b>																	
0.397	0.437	0.166	0.604	0.387	*0.009	0.958	0.999	0.710	7.860 10 <sup>-2</sup>	113.6	66.3	4.7	0.602	0.387	0.011	0.002	0.000
0.187	0.582	0.231	0.332	0.656	0.012	0.958	0.999	0.776	8.800 10 <sup>-2</sup>	143.9	82.6	5.4	0.344	0.642	0.013	0.002	0.014
0.559	0.205	0.236	0.810	0.175	0.014	0.996	0.999	0.723	7.740 10 <sup>-2</sup>	109.6	64.2	4.6	0.812	0.176	0.012	0.002	0.001
0.291	0.324	0.385	0.573	0.388	0.039	0.907	0.967	0.853	9.500 10 <sup>-2</sup>	162.6	95.4	6.9	0.571	0.398	0.031	0.002	0.010
0.226	0.483	0.291	0.394	0.583	0.022	0.939	0.991	0.806	9.010 10 <sup>-2</sup>	152.1	86.6	5.5	0.431	0.553	0.017	0.037	0.030
0.455	0.251	0.294	0.734	0.245	0.021	0.963	0.996	0.778	8.300 10 <sup>-2</sup>	126.7	73.2	5.1	0.740	0.244	0.016	0.006	0.001
0.629	0.174	0.197	0.865	0.124	0.011	0.999	0.998	0.685	7.350 10 <sup>-2</sup>	100.8	58.9	4.2	0.850	0.139	0.010	0.015	0.015
0.800	0.180	0.020	0.889	0.110	*0.001	0.999	0.977	0.962	6.520 10 <sup>-2</sup>	82.7	46.4	3.9	0.889	0.110	0.001	0.000	0.000
<b>T=20°C</b>																	
<b>P=100mm</b>																	
0.392	0.438	0.170	0.600	0.388	0.012	0.999	0.999	0.689	9.090 10 <sup>-2</sup>	155.8	87.3	6.0	0.610	0.382	0.008	0.010	0.006
0.183	0.582	0.235	0.320	0.664	0.016	0.999	0.997	0.725	1.022 10 <sup>-1</sup>	188.9	109.8	8.9	0.348	0.638	0.015	0.028	0.026
0.554	0.206	0.240	0.808	0.175	0.017	0.999	0.994	0.721	8.850 10 <sup>-2</sup>	147.2	83.6	5.5	0.817	0.171	0.011	0.009	0.004
0.283	0.324	0.392	0.577	0.380	0.043	0.943	0.934	0.838	1.007 10 <sup>-1</sup>	217.6	126.6	10.7	0.580	0.383	0.037	0.003	0.003
0.221	0.482	0.298	0.385	0.587	0.028	0.983	0.974	0.770	1.055 10 <sup>-1</sup>	197.5	117.1	9.1	0.429	0.550	0.021	0.044	0.037
0.449	0.250	0.301	0.727	0.250	0.023	0.987	0.973	0.770	9.650 10 <sup>-2</sup>	167.4	98.8	7.6	0.742	0.240	0.018	0.015	0.010
0.625	0.174	0.201	0.856	0.133	0.012	0.999	0.999	0.691	8.520 10 <sup>-2</sup>	137.6	77.2	5.3	0.858	0.134	0.008	0.002	0.001
0.795	0.170	0.035	0.887	0.111	*0.002	0.999	0.992	0.923	7.770 10 <sup>-2</sup>	111.9	65.1	4.6	0.889	0.110	0.001	0.002	0.001
<b>T=50°C</b>																	
<b>P=75mm</b>																	
0.382	0.438	0.180	0.580	0.407	0.013	0.999	0.938	0.547	3.905 10 <sup>-2</sup>	110.6	75.9	5.6	0.564	0.417	0.009	0.016	0.010
0.177	0.579	0.244	0.315	0.665	0.020	0.999	0.911	0.594	4.480 10 <sup>-2</sup>	134.6	94.8	7.6	0.137	0.668	0.015	0.002	0.003
0.541	0.203	0.255	0.791	0.187	0.018	0.999	0.871	0.668	3.940 10 <sup>-2</sup>	110.9	76.2	5.7	0.795	0.181	0.014	0.004	0.006
0.447	0.244	0.309	0.730	0.247	0.023	0.999	0.838	0.716	4.260 10 <sup>-2</sup>	123.7	85.1	6.6	0.749	0.232	0.019	0.019	0.015
0.286	0.307	0.408	0.564	0.390	0.045	0.973	0.778	0.797	5.140 10 <sup>-2</sup>	157.4	117.4	9.6	0.584	0.374	0.042	0.020	0.016
0.215	0.476	0.310	0.390	0.584	0.023	0.999	0.857	0.683	4.710 10 <sup>-2</sup>	147.3	101.7	8.2	0.422	0.554	0.023	0.032	0.030
0.619	0.171	0.210	0.840	0.147	0.012	0.999	0.897	0.628	3.750 10 <sup>-2</sup>	100.1	67.0	5.1	0.825	0.137	0.010	0.015	0.010

## 7. CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes de la presente investigación son las siguientes:

1.- Se han obtenido las isothermas de adsorción de metano, etileno, etano y propileno, tanto en estado puro como en sus mezclas binarias y ternarias sobre carbón activo AC-40 a temperaturas de 20°C y 50°C y en un intervalo de presiones de 0-750mm. de Hg. mediante una técnica experimental desarrollada en nuestro Departamento, complementada con el análisis de la fase gaseosa por cromatografía.

2.- Los datos de equilibrio han resultado totalmente reproducibles confirmandose la naturaleza física del fenómeno y que la capacidad de adsorción de los hidrocarburos crecía tanto con su peso molecular como con su grado de insaturación.

3.- Se han calculado las presiones superficiales de los cuatro hidrocarburos tanto en estado puro como formando parte de mezclas binarias. El concepto de presión superficial, es decir la que ejercen los adsorbatos sobre la superficie del adsorbente considerada como fase bidimensional en equilibrio con la gaseosa es básico en todo el tratamiento termodinámico desarrollado.

4.- Se han determinado las presiones que los hidrocarburos puros deberían tener en la fase gaseosa,  $P_i^0(\Pi)$ , para que adsorbidos cuando forman parte de las mezclas binarias ejerciesen la misma presión superficial que estos últimos y los coeficientes de actividad que les corresponden en ellas, a partir de la ley de Dalton y Raoult modificada.



5.- Los coeficientes de actividad calculados experimentalmente para las cinco mezclas binarias estudiadas, resultaron termodinámicamente consistentes, en los intervalos de presión y temperatura investigados. Concretamente los correspondientes a cuatro de ellas: metano-etileno, metano-etano, etileno-propileno y etano-propileno demostraron el comportamiento real de las mismas debido indudablemente a la competencia entre los componentes y el desplazamiento de unos por otros en la superficie del adsorbente. Por el contrario en el caso de la mezcla etileno-etano, en todas las condiciones de presión y temperatura investigadas, los coeficientes de actividad resultaron ser prácticamente la unidad, con lo que quedaba demostrado el comportamiento ideal de esta mezcla debido a la similitud de la capacidad de adsorción de sus componentes.

6.- Se han calculado teóricamente los coeficientes de actividad de los componentes de las cuatro mezclas binarias reales investigadas a partir de las ecuaciones propuestas por Wilson y Abrams y Prausnitz (UNIQUAC) para el equilibrio líquido-vapor. Con los valores experimentales de dichos coeficientes pudieron calcularse las dos constantes de cada una de las mezclas, recalculándose con estas constantes los valores de los coeficientes indicados. Las desviaciones medias entre unos y otros en todos los casos fueron del 5%.

7.- El tratamiento termodinámico desarrollado permite una excelente reproducción de los datos de equilibrio de adsorción en el caso de las mezclas binarias.

8.- Se han calculado teóricamente los coeficientes de actividad de los componentes de las mezclas ternarias: metano-etileno-etano y etileno-etano-propileno a partir de las ecuaciones propuestas por Wilson y Abrams y Prausnitz (UNIQUAC) para el equilibrio líquido-vapor en el caso de mezclas multicomponentes partiendo exclusivamente de las parejas de constantes de las tres mezclas binarias implícitas en cada una de ellas.

9.- El tratamiento termodinámico desarrollado ha permitido una excelente predicción de los datos de equilibrio de adsorción en el caso de las mezclas ternarias, en los intervalos de composiciones habituales en la práctica. Las desviaciones entre los datos experimentales y teóricos nunca fueron superiores al 5%.

10.- Como conclusión final puede establecerse que bastara - disponer de los datos de equilibrio de mezclas binarias, fácilmente obtenibles por la técnica propuesta en esta investigación para poder predecir los datos de equilibrio correspondientes a mezclas multicomponentes ya que no se prevee causa alguna que - impida ampliar a las mismas la precisa predicción alcanzada en el caso de mezclas ternarias.

## 8. RECOMENDACIONES

Del extenso campo posible se recomienda como pasos más inmediatos:

1.- El estudio del equilibrio de adsorción de las mezclas de metano-etileno-etano sobre carbón activo AC-40 a presiones - entre una y tres atmosferas frecuentes en refineria y superiores a las de nuestra investigación .

2.- El estudio del equilibrio de adsorción de la mezcla metano-etileno-etano con otros adsorbentes (zeolitas y otros tamices moleculares) en un amplio intervalo de presiones.

3.- El estudio del equilibrio con mezclas multicomponentes con más de tres adsorbatos, por ejemplo la que constituye la - fracción  $C_4$  de refineria con isómeros de butanos, butenos y butadienos, utilizando variados tipos de adsorbentes (carbón activo, zeolitas, tamices moleculares).

4.- La interpretación de los datos de equilibrio de los - distintos sistemas con miras a la separación de los componentes de las mezclas teniendo en cuenta las variadas capacidades de - adsorción de los mismos sobre los diferentes adsorbentes a causa del tamaño molecular, grado de insaturación y polaridad de - los primeros y características de los segundos (tamaño de poro, capacidad electrica de sus centros activos, etc.).

## 9. APENDICE

### 9.1. DETALLE DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

#### 9.1.1. Pureza de los compuestos utilizados

El helio calidad N-45 fué de pureza garantizada del 99.995% en volumen y se empleaba normalmente en el laboratorio como gas portador de los cromatógrafos de gases de conductividad térmica. No obstante se obtuvo un cromatograma del mismo utilizando nitrógeno calidad N-48 del 99.998% en volumen de pureza, como gas portador, no detectándose ninguna impureza.

El etileno calidad N-33 fué de una pureza real del 99.95% en volumen. No detectándose impurezas en su análisis.

El metano calidad N-35 fué de una pureza real del 99.95% en volumen. Siendo las impurezas más importantes etano y nitrógeno.

El etano calidad N-20 fué de una pureza del 99% en volumen, siendo las impurezas más importantes hidrocarburos de cadena más larga.

El propileno calidad N-20 fué de una pureza del 99% en volumen. Las impurezas más importantes fueron: etano, etileno y propano.

#### 9.1.2. Características de las partículas del adsorbente

##### i) *Dimensiones.*

Se determinaron los diámetros y longitudes de un deter

minado número de partículas, adoptándose los valores medios. Las medidas se hicieron directamente con un calibrador y los resultados se presentan en las filas 1 y 2 de la tabla 9.1.

ii) *Densidad y porosidad.*

La densidad aparente,  $d_A$ , se determinó por picnometría de mercurio en un porosímetro y la densidad real,  $d_R$ , por picnometría con helio, los resultados se muestran en las filas 3 y 4 de la tabla 9.1.

El volumen total de poros del adsorbente empleado,  $V_p$ , se determinó a partir de los valores obtenidos de las densidades real y aparente mediante la expresión:

$$V_p = \frac{1}{d_A} - \frac{1}{d_R}$$

La porosidad real de la partícula,  $\alpha_p$ , se calculó a partir de la relación:

$$\alpha_p = V_p \frac{1}{d_A}$$

Los resultados obtenidos para  $V_p$  y  $\alpha_p$  se reseñan en las filas 5 y 6 de la tabla 9.1.

iii) *Superficie específica.*

En esta investigación y dado que el carbón activo empleado posee un tamaño de poros relativamente grande, se utilizó el nitrógeno como gas adsorbato, a la temperatura de 79°K, en la determinación de la superficie específica mediante el método volumétrico B.E.T. (45), análogo al empleado en otras investigaciones (28). Las medidas realizadas y los resultados obtenidos se detallan en la tabla 9.2, resultando una superficie específica de 747m<sup>2</sup>/g.

TABLA 9.1

1	Radio medio de partícula (mm.)	0.83
2	Altura media de partícula (mm.)	4.26
3	Densidad aparente del adsorbente (g/cm <sup>3</sup> )	0.795
4	Densidad real del adsorbente (g/cm <sup>3</sup> )	2.700
5	Volumen total de poros (cm <sup>3</sup> /g)	0.905
6	Porosidad de partícula	0.715

MUESTRA: Carbón activo AC-40

Tiempo de desgasificación: 2h. 30m. Temperatura: 300°C

SIMBOLO	MEDIDAS	UNIDADES	RESULTADO
$W_2$ $W_1$ $W$	Peso de la muestra	g.	0.060
$P_a$	Presión atmosférica	mm. Hg.	715.5
$f$	Factor de corrección para condiciones STP		0.869
	Presión de inyección del gas portador(He)	in.	40.0
$t_c$	Tiempo entre dos marcas del gas portador	s.	14.8
$V_{med}$	Volumen burbujimetro calibrado	ml.	19.84
$F_c$	Caudal de gas portador(He)	ml/min.	80.43
$p_0$	Presión de saturación a la T del N <sub>2</sub> líquido	mm. Hg.	835.0
$s_0$	Area cubierta por 1 ml. (STP) de N <sub>2</sub>	m <sup>2</sup> /ml.	4.39
	Presión de inyección del gas de adsorción	in.	20.0
$t_t$	Tiempo entre marcas del gas total N <sub>2</sub> + He	s.	11.4
$F_t$	Caudal de gas total N <sub>2</sub> + He	ml/min.	104.42
$F_a$	Caudal de gas de adsorción	ml/min.	23.99
$A_{des}$	Area del pico de desorción	cuentas	2.502
$V_{cal}$	Volumen de celdilla de calibrado	ml.	1.123
$A_{cal}$	Area del pico de calibrado	cuentas	0.192
$V_{ads}$	Volumen de gas adsorbido	ml.	14.626
$V_{ads}$	Volumen de gas adsorbido corregido a STP	ml.	12.71
$p$	Presión parcial N <sub>2</sub>	mm. Hg.	164.38
$T_R$	Temperatura ambiente	°C	23.0

70108-2

## 9.2. DETALLES DEL PROCEDIMIENTO

### 9.2.1. Cálculo del volumen del adsorbente

Para determinar el volumen ocupado por el lecho adsorbente se tomó una muestra de 50g. de carbón activo, cantidad empleada en todos los experimentos de adsorción, midiéndose la altura que ocupaba el lecho de adsorción, de tal modo que el volumen real ocupado por el lecho,  $V_{LR}$ , sería:

$$V_{LR} = V_L(1-\alpha_L)$$

siendo  $V_L$  el volumen teórico ocupado por el lecho de adsorbente y  $\alpha_L$  la fracción de huecos en el lecho.

Los parámetros necesarios para el cálculo de  $V_{LR}$ , figuran en la tabla 9-3, resultando un volumen real ocupado por el lecho de:  $58.0 \text{ cm}^3$ .

### 9.2.2. Cálculo del volumen de la instalación

A fin de calcular el volumen de la instalación total -  $V_T$ , se ha considerado por separado una porción de la misma, situada a la derecha de las válvulas de aislamiento del lecho, de volumen  $V_A$ .

Las medidas se realizaron del modo siguiente: una vez hecho el vacío en todo el sistema hasta una presión de 0.1mm. - de Hg. se mantenía la misma durante 24 horas a una temperatura constante de  $20^\circ\text{C}$ , llenándose a continuación de helio hasta una presión  $P_i$ , ligeramente superior a la atmosférica. Posteriormente se introducía un volumen  $V$  de helio en la bureta de gases, a presión atmosférica  $P_a$ , y temperatura ambiente,  $T_A$ . Se introducía dicho volumen,  $V$ , de helio en la instalación, en la que previamente se habían cerrado las llaves del aislamiento del lecho, es decir en la zona a la derecha de las válvulas, de volumen  $V_A$  se leía en el manómetro la nueva presión  $P_m$ , a continuación se



abrían las llaves de aislamiento de lecho y la presión adquiriría el valor final  $P_f$ , correspondiente al volumen total  $V_T$ .

En la determinación de  $V_A$  y  $V_T$ , se operó del siguiente modo:

En las condiciones iniciales:

$$V_A P_i = nRT$$

Expresión en la que todos sus términos son conocidos excepto el número de moles de helio,  $n$ , presentes en el volumen  $V_A$ , - al comienzo del ensayo.

Después de añadir el volumen  $V$ , se transformaría en:

$$V_A P_m = n'RT$$

Siendo  $n'$  el número de moles de helio presentes en  $V_A$ , y como:

$$VP_A = (n' - n)RT$$

De las tres expresiones anteriores, resultaba:

$$V_A = V \frac{P_a}{P_m - P_i}$$

y paralelamente:

$$V_T = V \frac{P_a}{P_f - P_i}$$

Este procedimiento se repitió varias veces, con diferentes valores de  $P_i$ , a fin de precisar las medidas. La tabla 9.4 reproduce los datos obtenidos en siete ensayos diferentes.

Los Valores medios de los respectivos volúmenes  $V_A$  y  $V_T$  resultaron ser:

$$V_A = 781 \pm 12$$

$$V_T = 1881 \pm 32$$

representando los errores el 1.5% y el 2% respectivamente.

Longitud del lecho (mm.)	445
Diámetro del lecho (mm.)	51.0
Volúmen teórico ocupado por el lecho (cm <sup>3</sup> )	91.0
Densidad de partícula (g/cm <sup>3</sup> )	0.873
Volúmen ocupado por el sólido (cm <sup>3</sup> )	57.3
Fracción de huecos en el lecho	0.370
Volúmen real ocupado por el lecho (cm <sup>3</sup> )	58.0

TABLA 9-3

#### 9.2.3. Análisis cromatográfico: Condiciones generales

— Mezclas: Helio-Metano-Etileno; Helio-Metano-Etano; Helio-Etano-Etileno.

Gas portador.- Nitrógeno EX-45

Caudal.- 30 cm<sup>3</sup>/m.

Temperatura del detector.- 150°C

Temperatura del horno.- 150°C

Temperatura de la válvula de inyección.- 40°C

Corriente del detector.- 190mA

Columna.- 6 pies, 1/8 pulgada, acero inoxidable. Carbo-sieve B 80/100 mallas.

— Mezclas: Helio-Etano-Propileno; Helio-Etileno-Propileno

Gas portador.- Helio N-45

Caudal.- 30 cm<sup>3</sup>/m.

Temperatura del detector.- 150°C

Exp	P <sub>a</sub>	T	P <sub>i</sub>	P <sub>m</sub>	P <sub>F</sub>	V	V <sub>A</sub>	V <sub>T</sub>
1	696.5	15	52.5	137.5	88.5	9.75 10 <sup>-2</sup>	7.989 10 <sup>-1</sup>	1.8863
2	696.5	15	88.5	160.5	118.0	8.15 10 <sup>-2</sup>	7.874 10 <sup>-1</sup>	1.9242
3	696.5	15	20.0	93.0	50.0	8.07 10 <sup>-2</sup>	7.699 10 <sup>-1</sup>	1.8674
4	696.5	15	49.9	123.5	81.0	8.11 10 <sup>-2</sup>	7.706 10 <sup>-1</sup>	1.8280
5	695.1	16	90.0	176.5	125.5	9.77 10 <sup>-2</sup>	7.851 10 <sup>-1</sup>	1.9130
6	695.1	16	70.5	158.0	107.0	9.78 10 <sup>-2</sup>	7.769 10 <sup>-1</sup>	1.8625
7	695.1	16	26.0	113.5	62.0	9.75 10 <sup>-2</sup>	7.745 10 <sup>-1</sup>	1.8826
	mm.	°C	mm.	mm.	mm.	l.	l.	l.

TABLA 9-4

Temperatura del horno.- 90°C

Temperatura de la válvula de inyección.- 40°C

Corriente del detector.- 230mA

Columna.- 4 pies, 1/8 pulgada, acero inoxidable. Porapak Q 80/100 mallas.

- Mezclas: Helio-Etano-Etileno-Propileno.

Gas portador.- Helio N-45

Caudal.- 30 cm<sup>3</sup>/m.

Temperatura del detector.- 150°C

Temperatura del horno.- 90°C

Temperatura de la válvula de inyección.- 40°C

Corriente del detector.- 230mA

Columna.- 4 pies, 1/8 pulgada, acero inoxidable. Porapak Q 80/100 mallas.

- Mezclas: Helio-Metano-Etano-Etileno.

Gas portador.- Helio N-45

Caudal.- 15 cm<sup>3</sup>/m.

Temperatura del detector.- 100°C

Temperatura del horno.- 90°C

Temperatura de la válvula de inyección.- 40°C

Corriente de puente.- 210mA

Columna.- 14 pies, 1/8 pulgada, acero inoxidable. Porapak Q 80/100 mallas.

Las curvas de calibrado para cada una de estas mezclas se presentan en las figuras 9-1 a 9-4, representando en abscisas presiones parciales de cada gas y en ordenadas alturas de los picos cromatográficos.

#### 9.2.4. Cálculo de un experimento

##### i) *Isoterma de adsorción de un componente puro*

Como se explicó en el capítulo 4, en cada experimento, una vez alcanzado el estado de equilibrio, se analizaba cuantitativamente el gas y mediante un balance de materia, se determinaba el número de moles de componente adsorbido.

A título de ejemplo se ha elegido, la isoterma de adsorción de propileno sobre carbón activo AC-40 a 20°C.

Experimento 1:

$$\begin{aligned} \text{Moles de propileno introducidos} &= N_{P_1} = \frac{P_a V_{P_1}}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{694.7}{760}\right) (0.3661)}{(0.082) (293)} = 1.393 \cdot 10^{-2} \text{ moles.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión total alcanzada} &= P_{P_1} = \frac{N_{P_1} RT}{V_R} = \\ &= \frac{(1.393 \cdot 10^{-2}) (0.082) (293)}{(1.853)} = 139.5 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Siendo:

$V_{P_1}$  = Volumen de propileno (1) a  $P_a = 694.7$  mm. de Hg. y  
 $T = 293^\circ \text{K}$ .

$V_R$  = volumen real de la instalación = 1.853 l. (apéndice 9.2.2.)

Cromatograma de la fase gaseosa en equilibrio.

Altura media de los picos:

De la figura 9-5,  $\bar{r}_p = 1.6$  mm., correspondiente en la curva de calibrado de la figura 9-2 del apartado 9.2.3. a una presión final de equilibrio de:  $P_1 = 0.24$  mm. de Hg.

$$\begin{aligned} \text{Moles de propileno en la fase gaseosa} &= N'_{P_1} = \frac{P_1 V_R}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{0.24}{760}\right) (1.853)}{(0.082) (293)} = 2.436 \cdot 10^{-5} \text{ moles} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de propileno adsorbidos} &= N_{t_{P_1}} = N_{P_1} - N'_{P_1} = \\ &= (1.393 \cdot 10^{-2}) - (2.436 \cdot 10^{-5}) = 1.390 \cdot 10^{-2} \text{ moles} \end{aligned}$$

Experimentos 2 a 11:

De igual forma se han calculado 10 estados de equilibrio, correspondientes a sucesivas adiciones de propileno. En la tabla 9-5 se recogen los valores obtenidos.

Exp.	$P_a$	$V_{P_i} =$	$N_{P_i} =$	$\Sigma N_{P_i} =$	$P_{P_i} =$	$\Sigma P_{P_i} =$	$P_p =$	$N_{t_p} =$
51-1	694.7	$3.661 \cdot 10^{-1}$	$1.393 \cdot 10^{-2}$	$1.393 \cdot 10^{-2}$	139.5	139.5	0.24	$1.390 \cdot 10^{-2}$
51-2	695.1	$4.566 \cdot 10^{-1}$	$1.738 \cdot 10^{-2}$	$3.131 \cdot 10^{-2}$	174.1	313.6	2.56	$3.105 \cdot 10^{-2}$
51-3	695.3	$5.481 \cdot 10^{-1}$	$2.087 \cdot 10^{-2}$	$5.218 \cdot 10^{-2}$	209.0	522.6	12.80	$5.090 \cdot 10^{-2}$
51-4	695.4	$5.480 \cdot 10^{-1}$	$2.087 \cdot 10^{-2}$	$7.305 \cdot 10^{-2}$	209.1	731.7	30.03	$7.005 \cdot 10^{-2}$
51-5	695.8	$6.398 \cdot 10^{-1}$	$2.438 \cdot 10^{-2}$	$9.743 \cdot 10^{-2}$	244.2	975.9	64.90	$9.095 \cdot 10^{-2}$
51-6	695.8	$6.388 \cdot 10^{-1}$	$2.434 \cdot 10^{-2}$	$1.217 \cdot 10^{-1}$	243.8	1219.7	122.19	$1.095 \cdot 10^{-1}$
51-7	696.2	$6.384 \cdot 10^{-1}$	$2.434 \cdot 10^{-2}$	$1.461 \cdot 10^{-1}$	243.8	1463.5	209.14	$1.252 \cdot 10^{-1}$
51-8	696.5	$6.394 \cdot 10^{-1}$	$2.439 \cdot 10^{-2}$	$1.705 \cdot 10^{-1}$	244.3	1707.8	327.70	$1.378 \cdot 10^{-1}$
51-9	696.9	$6.393 \cdot 10^{-1}$	$2.440 \cdot 10^{-2}$	$1.949 \cdot 10^{-1}$	244.4	1952.2	463.78	$1.486 \cdot 10^{-1}$
51-10	697.2	$6.398 \cdot 10^{-1}$	$2.443 \cdot 10^{-2}$	$2.193 \cdot 10^{-1}$	244.7	2196.9	618.47	$1.575 \cdot 10^{-1}$
51-11	698.0	$3.657 \cdot 10^{-1}$	$1.398 \cdot 10^{-2}$	$2.333 \cdot 10^{-1}$	140.0	2336.9	713.63	$1.620 \cdot 10^{-1}$
	mm.	l.	moles	moles	mm.	mm.	mm.	moles

TABLA 9-5

ii) *Isoterma de adsorción de una mezcla binaria*

A título de ejemplo se ha elegido la mezcla Etano-Propileno sobre carbón activo AC-40 a 20°C y con relación  $V_E^-:V_P^=$  de 5:1

Experimento 1:

$$\begin{aligned} \text{Moles de Etano introducidos} &= N_{E_1}^- = \frac{P_a V_{E_1}^-}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{702.4}{760}\right) (0.456)}{(0.082) (293)} = 1.754 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Propileno introducidos} &= N_{P_1}^= = \frac{P_a V_{P_1}^=}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{702.4}{760}\right) (0.09109)}{(0.082) (293)} = 3.504 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión de Etano alcanzada} &= P_{E_1}^- = \frac{N_{E_1}^- RT}{V_R} = \\ &= \frac{(1.754 \cdot 10^{-2}) (0.082) (293)}{(1.853)} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión de Propileno alcanzada} &= P_{P_1}^= = \frac{N_{P_1}^= RT}{V_R} = \\ &= \frac{(3.504 \cdot 10^{-3}) (0.082) (293)}{(1.853)} = \end{aligned}$$

Siendo:

$V_{E_1}^-$  = volumen de Etano (1) a  $P_a = 702.4$  mm. de Hg. y  
 $T = 293^\circ\text{K}$ .

$V_{P_1}^=$  = volumen de Propileno (1) a  $P_a = 702.4$  mm. de Hg.  
 y  $T = 293^\circ\text{K}$ .

$V_R$  = volumen real de la instalación = 1.583 l. (apéndice 9.2.2.)

Cromatograma de la fase gaseosa en equilibrio:



Altura media de los picos de etano y propileno:

De la figura 9-6, resulta:

$$r_{E_1}^- = 127.0 \text{ mm.}$$

$$r_{P_1}^- = 0 \text{ mm.}$$

correspondientes en la curva de calibrado de la figura 9-2 del apartado 9.2.3. a unas presiones finales de equilibrio de:

$$P_{E_1}' = 15.24 \text{ mm. de Hg.}$$

$$P_{P_1}' = 0 \text{ mm. de Hg.}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de etano en la fase gaseosa} &= N_{E_1}' = \frac{P_{E_1}' V_R}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{15.24}{760}\right) (1.853)}{(0.082) (293)} = 1.530 \cdot 10^{-3} \text{ moles} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de propileno en la fase gaseosa} &= N_{P_1}' = \frac{P_{P_1}' V_R}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{0}{760}\right) (1.853)}{(0.082) (293)} = 0 \text{ moles} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de etano adsorbidos} &= n_{E_1}^- = N_{E_1}^- - N_{E_1}' = \\ &= (1.754 \cdot 10^{-2}) - (1.530 \cdot 10^{-3}) = 1.602 \cdot 10^{-2} \text{ moles} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de propileno adsorbidos} &= n_{P_1}^- = N_{P_1}^- - N_{P_1}' = \\ &= (3.504 \cdot 10^{-3}) - (0) = 3.504 \cdot 10^{-3} \text{ moles} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles totales adsorbidos} &= N_{t_1} = n_{E_1}^- + n_{P_1}^- = \\ &= (1.602 \cdot 10^{-2}) + (3.504 \cdot 10^{-3}) = 1.952 \cdot 10^{-2} \text{ moles} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión total de equilibrio} &= P_1 = P_{E_1}' + P_{P_1}' = \\ &= (15.24) + (0) = 15.24 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Experimentos 2 a 9:

De igual forma se han calculado 9 estados de equili-

brio, correspondientes a sucesivas adiciones de etano y propileno en la proporción fijada. En la tabla 9-6 se recogen los valores obtenidos.

Exp.	$V_{E_i^-}$	$N_{E_i^-}$	$\Sigma N_{E_i^-}$	$P_{E_i^-}$	$\Sigma P_{E_i^-}$	$V_{P_i^-}$	$N_{P_i^-}$	$\Sigma N_{P_i^-}$
52-1	$4.560 \cdot 10^{-1}$	$1.754 \cdot 10^{-2}$	$1.754 \cdot 10^{-2}$	175.7	175.7	$9.109 \cdot 10^{-2}$	$3.504 \cdot 10^{-3}$	3.504
52-2	$4.561 \cdot 10^{-1}$	$1.756 \cdot 10^{-2}$	$3.510 \cdot 10^{-2}$	175.9	351.6	$9.119 \cdot 10^{-2}$	$3.511 \cdot 10^{-3}$	7.015
52-3	$4.565 \cdot 10^{-1}$	$1.758 \cdot 10^{-2}$	$5.268 \cdot 10^{-2}$	176.1	527.7	$9.140 \cdot 10^{-2}$	$3.520 \cdot 10^{-3}$	1.053
52-4	$4.562 \cdot 10^{-1}$	$1.757 \cdot 10^{-2}$	$7.025 \cdot 10^{-2}$	176.0	703.7	$9.118 \cdot 10^{-2}$	$3.512 \cdot 10^{-3}$	1.404
52-5	$4.565 \cdot 10^{-1}$	$1.758 \cdot 10^{-2}$	$8.783 \cdot 10^{-2}$	176.1	879.8	$9.140 \cdot 10^{-2}$	$3.520 \cdot 10^{-3}$	1.756
52-6	$4.565 \cdot 10^{-1}$	$1.758 \cdot 10^{-2}$	$1.054 \cdot 10^{-1}$	176.1	1055.9	$9.118 \cdot 10^{-2}$	$3.513 \cdot 10^{-3}$	2.107
52-7	$4.562 \cdot 10^{-1}$	$1.757 \cdot 10^{-2}$	$1.229 \cdot 10^{-1}$	176.0	1231.9	$9.118 \cdot 10^{-2}$	$3.513 \cdot 10^{-3}$	2.458
52-8	$4.565 \cdot 10^{-1}$	$1.758 \cdot 10^{-2}$	$1.405 \cdot 10^{-1}$	176.0	1407.9	$9.118 \cdot 10^{-2}$	$3.513 \cdot 10^{-3}$	2.809
52-9	$4.565 \cdot 10^{-1}$	$1.758 \cdot 10^{-2}$	$1.581 \cdot 10^{-1}$	176.0	1583.9	$9.118 \cdot 10^{-2}$	$3.513 \cdot 10^{-3}$	3.160
	l.	moles	moles	mm.	mm.	l.	moles	mol

TABLA 9-6

Exp.	$P_{P_i} =$	$\Sigma P_{P_i} =$	$P_{E_i} =$	$P_{P_i} =$	P	$n_{E^-}$	$n_{P^+}$	$N_t$
52-1	35.1	35.1	15.24	0	15.24	$1.602 \cdot 10^{-2}$	$3.504 \cdot 10^{-3}$	$1.952 \cdot 10^{-2}$
52-2	35.1	70.3	50.95	0.33	51.28	$3.002 \cdot 10^{-2}$	$6.893 \cdot 10^{-3}$	$3.700 \cdot 10^{-2}$
52-3	35.3	105.5	103.02	1.59	104.61	$4.240 \cdot 10^{-2}$	$1.037 \cdot 10^{-2}$	$5.277 \cdot 10^{-2}$
52-4	35.2	140.7	171.88	3.52	175.40	$5.310 \cdot 10^{-2}$	$1.370 \cdot 10^{-2}$	$6.680 \cdot 10^{-2}$
52-5	35.3	176.0	253.69	5.97	259.66	$6.251 \cdot 10^{-2}$	$1.698 \cdot 10^{-2}$	$7.949 \cdot 10^{-2}$
52-6	35.2	211.2	345.57	9.39	354.96	$7.092 \cdot 10^{-2}$	$2.015 \cdot 10^{-2}$	$9.107 \cdot 10^{-2}$
52-7	35.2	246.4	457.06	13.76	470.82	$7.736 \cdot 10^{-2}$	$2.323 \cdot 10^{-2}$	$1.006 \cdot 10^{-1}$
52-8	35.2	281.6	569.76	19.11	588.87	$8.368 \cdot 10^{-2}$	$2.621 \cdot 10^{-2}$	$1.099 \cdot 10^{-1}$
52-9	35.2	316.8	706.62	25.23	731.85	$8.759 \cdot 10^{-2}$	$2.911 \cdot 10^{-2}$	$1.167 \cdot 10^{-1}$
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	moles	moles	moles

TABLA 9-6 cont.

iii) *Isoterma de adsorción de una mezcla ternaria*

A título de ejemplo se ha elegido la mezcla Etileno-Etano-Propileno sobre carbón activo AC-40 a 20°C y con relación  $V_E = V_E^- = V_P =$  de 2:1:1.

Experimento 1:

$$\begin{aligned} \text{Moles de Etileno introducidos} &= N_{E_1} = \frac{P_a V_{E_1}}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{707.8}{760}\right) (0.1754)}{(0.082) (293)} = 6.810 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Etano introducidos} &= N_{E_1^-} = \frac{P_a V_{E_1^-}}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{707.8}{760}\right) (0.0876)}{(0.082) (293)} = 3.400 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Propileno introducidos} &= N_{P_1} = \frac{P_a V_{P_1}}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{707.8}{760}\right) (0.0876)}{(0.082) (293)} = 3.400 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión de Etileno alcanzada} &= P_{E_1} = \frac{N_{E_1} RT}{V_R} = \\ &= \frac{(6.810 \cdot 10^{-3}) (0.082) (293)}{(1.853)} = 67.00 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión de Etano alcanzada} &= P_{E_1^-} = \frac{N_{E_1^-} RT}{V_R} = \\ &= \frac{(3.400 \cdot 10^{-3}) (0.082) (293)}{(1.853)} = 33.46 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión de Propileno alcanzada} &= P_{P_1} = \frac{N_{P_1} RT}{V_R} = \\ &= \frac{(3.400 \cdot 10^{-3}) (0.082) (293)}{(1.853)} = 33.46 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Siendo:

$V_{E_1}$  = volumen de Etileno (1) a  $P_a = 707.8$  mm. de Hg.  
y  $T = 293^\circ\text{K}$ .

$V_{E_1^-}$  = volumen de Etano (1) a  $P_a = 707.8$  mm. de Hg. y

$$T = 293^{\circ}\text{K.}$$

$V_{P_1} =$  volumen de Propileno (1) a  $P_a = 707.8$  mm. de Hg. y  $T = 293^{\circ}\text{K.}$

$V_R =$  volumen real de la instalación = 1.853 l. (apén dice 9.2.2.)

Cromatograma de la fase gaseosa en equilibrio.

Altura media de los picos de Etileno, Etano y Propileno:

De la figura 9-7, resulta:

$$r_{E_1} = 155.0 \text{ mm.}$$

$$r_{E_1} = 46.3 \text{ mm.}$$

$$r_{P_1} = 1.1 \text{ mm.}$$

correspondientes en la curva de calibrado de la figura 9-3 del apartado 9.2.3. a unas presiones finales de equilibrio de:

$$P'_{E_1} = 7.00 \text{ mm. de Hg.}$$

$$P'_{E_1} = 2.42 \text{ mm. de Hg.}$$

$$P'_{P_1} = 0.28 \text{ mm. de Hg.}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Etileno en la fase gaseosa} &= N'_{E_1} = \frac{P'_{E_1} V_R}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{7.00}{760}\right) (1.853)}{(0.082) (293)} = 7.210 \cdot 10^{-4} \text{ moles.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Etano en la fase gaseosa} &= N'_{E_1} = \frac{P'_{E_1} V_R}{RT} = \\ &= \frac{\left(\frac{2.42}{760}\right) (1.853)}{(0.082) (293)} = 2.500 \cdot 10^{-4} \text{ moles.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Propileno en la fase gaseosa} &= N_{P_1}' = \frac{P_{P_1}' V_R}{RT} = \\ &= \frac{(0.28)}{(760)} (1.853) \\ &= \frac{(0.082) (293)}{(0.082) (293)} = 3.300 \cdot 10^{-5} \text{ moles.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Etileno adsorbidos} &= n_{E_1}^- = N_{E_1}^- - N_{E_1}' = \\ &= (6.810 \cdot 10^{-3}) - (7.210 \cdot 10^{-4}) = 6.089 \cdot 10^{-3} \text{ moles.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Etano adsorbidos} &= n_{E_1}^- = N_{E_1}^- - N_{E_1}' = \\ &= (3.400 \cdot 10^{-3}) - (2.500 \cdot 10^{-4}) = 3.150 \cdot 10^{-3} \text{ moles.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de Propileno adsorbidos} &= n_{P_1}^- = N_{P_1}^- - N_{P_1}' = \\ &= (3.400 \cdot 10^{-3}) - (3.300 \cdot 10^{-5}) = 3.367 \cdot 10^{-3} \text{ moles.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles totales adsorbidos} &= N_{t_1} = n_{E_1}^- + n_{E_1}^- + n_{P_1}^- = \\ &= (6.089 \cdot 10^{-3}) + (3.150 \cdot 10^{-3}) + (3.367 \cdot 10^{-3}) = \\ &= 1.261 \cdot 10^{-2} \text{ moles.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presión total de equilibrio} &= P_1 = P_{E_1}' + P_{E_1}' + P_{P_1}' = \\ &= (7.00) + (2.42) + (0.28) = 9.7 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Experimentos 2 a 6:

De igual forma se han calculado 6 estados de equilibrio, correspondientes a sucesivas adiciones de Etileno, Etano y Propileno en la proporción fijada. En la tabla 9-7 se recogen los valores obtenidos.

Exp.	$P_a$	$V_{E_i}^=$	$N_{E_i}^=$	$\Sigma N_{E_i}^=$	$P_{E_i}^=$	$\Sigma P_{E_i}^=$	$V_{E_i}^-$	$N_{E_i}^-$
106-1	707.8	0.1754	$6.810 \cdot 10^{-3}$	$6.810 \cdot 10^{-3}$	67.0	67.0	0.0876	$3.400 \cdot 10^{-3}$
106-2	707.6	0.1754	$6.810 \cdot 10^{-3}$	$1.362 \cdot 10^{-2}$	66.9	134.0	0.0876	$3.400 \cdot 10^{-3}$
106-3	706.8	0.1754	$6.790 \cdot 10^{-3}$	$2.041 \cdot 10^{-2}$	66.9	200.9	0.0876	$3.390 \cdot 10^{-3}$
106-4	706.4	0.1755	$6.780 \cdot 10^{-3}$	$2.719 \cdot 10^{-2}$	66.9	267.8	0.0876	$3.380 \cdot 10^{-3}$
106-5	705.9	0.3507	$1.356 \cdot 10^{-2}$	$4.075 \cdot 10^{-2}$	133.6	401.4	0.1756	$6.790 \cdot 10^{-3}$
106-6	705.6	0.3504	$1.354 \cdot 10^{-2}$	$5.429 \cdot 10^{-2}$	133.4	534.8	0.1750	$6.760 \cdot 10^{-3}$
	mm.	l.	moles	moles	mm.	mm.	l.	moles

TABLA 9-7



Exp.	$\Sigma N_{E_i}^-$	$P_{E_i}^-$	$\Sigma P_{E_i}^-$	$V_{P_i}^-$	$N_{P_i}^-$	$\Sigma N_{P_i}^-$	$P_{P_i}^-$	$\Sigma P_{P_i}^-$
106-1	$3.400 \cdot 10^{-3}$	33.5	33.5	0.0876	$3.400 \cdot 10^{-3}$	$3.400 \cdot 10^{-3}$	33.5	33.5
106-2	$6.800 \cdot 10^{-3}$	33.5	66.9	0.0876	$3.400 \cdot 10^{-3}$	$6.800 \cdot 10^{-3}$	33.5	66.9
106-3	$1.019 \cdot 10^{-2}$	33.4	100.3	0.0876	$3.390 \cdot 10^{-3}$	$1.019 \cdot 10^{-2}$	33.4	100.3
106-4	$1.357 \cdot 10^{-2}$	33.4	133.7	0.0875	$3.380 \cdot 10^{-3}$	$1.357 \cdot 10^{-2}$	33.4	133.6
106-5	$2.036 \cdot 10^{-2}$	66.9	200.6	0.1750	$6.770 \cdot 10^{-3}$	$2.034 \cdot 10^{-2}$	66.7	200.3
106-6	$2.712 \cdot 10^{-2}$	66.6	267.2	0.1750	$6.760 \cdot 10^{-3}$	$2.710 \cdot 10^{-2}$	66.6	266.9
	moles	mm.	mm.	l.	moles	moles	mm.	mm.

TABLA 9-7 cont.

Exp.	$P_E'$	$P_E'^{-}$	$P_p'$	P	$n_E'$	$n_E^{-}$	$n_p'$	$N_t$
106-1	7.00	2.42	0.28	9.70	$6.089 \cdot 10^{-3}$	$3.150 \cdot 10^{-3}$	$3.367 \cdot 10^{-3}$	$1.261 \cdot 10^{-2}$
106-2	19.51	5.25	0.66	25.42	$1.162 \cdot 10^{-2}$	$6.257 \cdot 10^{-3}$	$6.723 \cdot 10^{-3}$	$2.460 \cdot 10^{-2}$
106-3	41.70	13.64	1.01	56.33	$1.616 \cdot 10^{-2}$	$8.794 \cdot 10^{-3}$	$1.008 \cdot 10^{-2}$	$3.503 \cdot 10^{-2}$
106-4	69.72	23.53	2.30	95.55	$2.010 \cdot 10^{-2}$	$1.118 \cdot 10^{-2}$	$1.332 \cdot 10^{-2}$	$4.460 \cdot 10^{-2}$
106-5	135.90	49.94	5.61	191.42	$2.694 \cdot 10^{-2}$	$1.529 \cdot 10^{-2}$	$1.976 \cdot 10^{-2}$	$6.199 \cdot 10^{-2}$
106-6	219.00	81.43	10.93	311.36	$3.205 \cdot 10^{-2}$	$1.885 \cdot 10^{-2}$	$2.598 \cdot 10^{-2}$	$7.688 \cdot 10^{-2}$
	mm.	mm.	mm.	mm.	moles	moles	moles	moles

TABLA 9-7 cont.

### 9.2.5. Cálculo de la presión superficial

#### i) Componentes puros

Como se indica en el apartado 2.2.1., mediante la integración grafica del segundo miembro de la ecuación

$$\frac{\pi A}{RT} = \int_0^P \frac{N_t}{P} dP \quad [2-9]$$

a partir de las isotermas de los componentes puros, curvas o -  
tablas de valores  $N_t$  frente a  $P$ , se calcula la presión superfi  
cial de cada uno de ellos en función de su presión.

A titulo de ejemplo se ha elegido el cálculo de la -  
presión superficial de propileno a 20°C.

A partir de los datos experimentales tabla 5-4 se de-  
termina la expresión subintegral  $\frac{N_t}{P}$  para cada valor de  $P$ , ta-  
bla 9-8. Representando la primera  $\frac{N_t}{P}$  frente a la segunda, figura  
9-8 , y midiendo las areas entre la curva y los dos ejes coor-  
denados hasta los valores correspondientes a cada presión re-  
sultan los valores,  $\frac{\pi A}{RT}$ , que se indican el la tabla 9-8.

$\frac{N_t}{P}$	P	$\frac{\pi A}{RT}$
1.2129 10 <sup>-2</sup>	2.56	3.3659 10 <sup>-2</sup>
3.9766 10 <sup>-3</sup>	12.80	1.1612 10 <sup>-1</sup>
2.3327 10 <sup>-3</sup>	30.03	1.7948 10 <sup>-1</sup>
1.4014 10 <sup>-3</sup>	64.90	2.3558 10 <sup>-1</sup>
8.9672 10 <sup>-4</sup>	122.19	3.0141 10 <sup>-1</sup>
5.9879 10 <sup>-4</sup>	209.14	3.6643 10 <sup>-1</sup>
4.2048 10 <sup>-4</sup>	377.70	4.2685 10 <sup>-1</sup>
3.2041 10 <sup>-4</sup>	463.78	4.7726 10 <sup>-1</sup>
2.5481 10 <sup>-4</sup>	618.47	5.2175 10 <sup>-1</sup>
2.2709 10 <sup>-4</sup>	713.63	5.4468 10 <sup>-1</sup>

TABLA 9-8

De igual forma se calcularon las presiones ejercidas - por el resto de adsorbatos a las temperaturas de 20°C y 50°C, - tablas 6-1 a 6-4.

En algunas ocasiones debido a la ausencia de datos de equilibrio precisos para cantidades adsorbidas pequeñas, que dificulta la extrapolación para  $P=0$ , de la curva  $N_t$  frente a  $P$ , - la ecuación [2-9] se sustituye por:  $\frac{N_t}{P}$

$$\frac{\Pi A}{RT} = \int_0^{N_t} \frac{d \ln P}{d \ln N_t} dN_t \quad [2-15]$$

Los resultados obtenidos mediante ambas expresiones - se comprobó eran practicamente coincidentes, con las curvas en que los datos para pequeñas cantidades adsorbidas eran suficientemente precisas.

## ii) Mezclas binarias

Como se indica en el apartado 2.2.2., mediante la integración gráfica del segundo miembro de la ecuación [2-20] es posible calcular la presión superficial correspondiente a la mezcla considerada de composición conocida, ecuación [2-21] , de - tal modo que llevando dicho valor a las curvas  $\frac{\Pi A}{RT}$  frente a  $P$ , - de cada uno de los componentes puros a la temperatura de que se trate, se localicen en sus abscisas los valores de las presiones  $P_i^0(\Pi)$  necesarios en la ecuación de Raoult [2-14] , para el posterior cálculo del coeficiente de actividad de la fase adsorbida.

A titulo de ejemplo se ha elegido el calculo de la presión superficial de la mezcla etano-propileno a 20°C de temperatura y 75mm. de presión de equilibrio. A partir de los datos experimentales, tabla 5-9a, es posible construir la curva de la - figura 9-9 , cuya ordenada corresponde a la cantidad subintegral de la ecuación [2-20] ,  $N_t \frac{x_2 y_2}{y_1 y_2}$ , y la abscisa a la fracción molar  $y_2$  (refiriendose el  $y_1 y_2$  subindice dos al componente que más se adsorbe). De tal modo que midiendo las areas entre la curva y los dos ejes coordenados hasta los valores correspondientes a cada fracción molar,  $y_2$ , resultan los valores  $\frac{\Delta \Pi y_1 y_2^A}{RT}$ , que su-

mados al termino  $\frac{\Pi A}{RT}$  correspondiente al componente menos adsorbido conducen a  $\frac{\Pi y_1 y_2^A}{RT}$  los valores buscados, de la mezcla. Con ellos, localizados en las ordenadas de  $\frac{\Pi A}{RT}$  las curvas,  $\frac{\Pi A}{RT}$  frente a P, para ambos componentes, figura 6-5, se encuentran en abscisas los valores  $P_1^0(\Pi)$  y  $P_2^0(\Pi)$ . En la tabla 9-9 se recogen dichos valores asi como los correspondientes a la presión superficial de la mezcla y las fracciones molares de ambas fases en equilibrio.

$x_1$	$y_1$	$N_t \frac{x_2 - y_2}{y_1 - y_2}$	$\frac{\Pi y_1 y_2^A}{RT}$	$P_1^0$	$P_2^0$
0.807	0.989	$7.4557 \cdot 10^{-1}$	$9.210 \cdot 10^{-2}$	92.0	5.5
0.619	0.954	$3.4466 \cdot 10^{-1}$	$1.081 \cdot 10^{-1}$	123.0	10.5
0.277	0.798	$1.9922 \cdot 10^{-1}$	$1.536 \cdot 10^{-1}$	257.0	23.5
0.126	0.565	$1.3172 \cdot 10^{-1}$	$1.922 \cdot 10^{-1}$	424.5	38.8
0.064	0.363	$9.9970 \cdot 10^{-2}$	$2.156 \cdot 10^{-1}$	557.0	51.9
0.021	0.156	$8.6320 \cdot 10^{-2}$	$2.348 \cdot 10^{-1}$	735.0	63.9
0.000	0.000	$7.6030 \cdot 10^{-2}$	$2.475 \cdot 10^{-1}$	-	-

TABLA 9-9

De igual forma se calcularon las presiones superficiales y las  $P_i^0(\Pi)$  para las diferentes mezclas a las presiones y temperaturas investigadas, indicandose sus valores en las tablas 6-5 a 6-9.

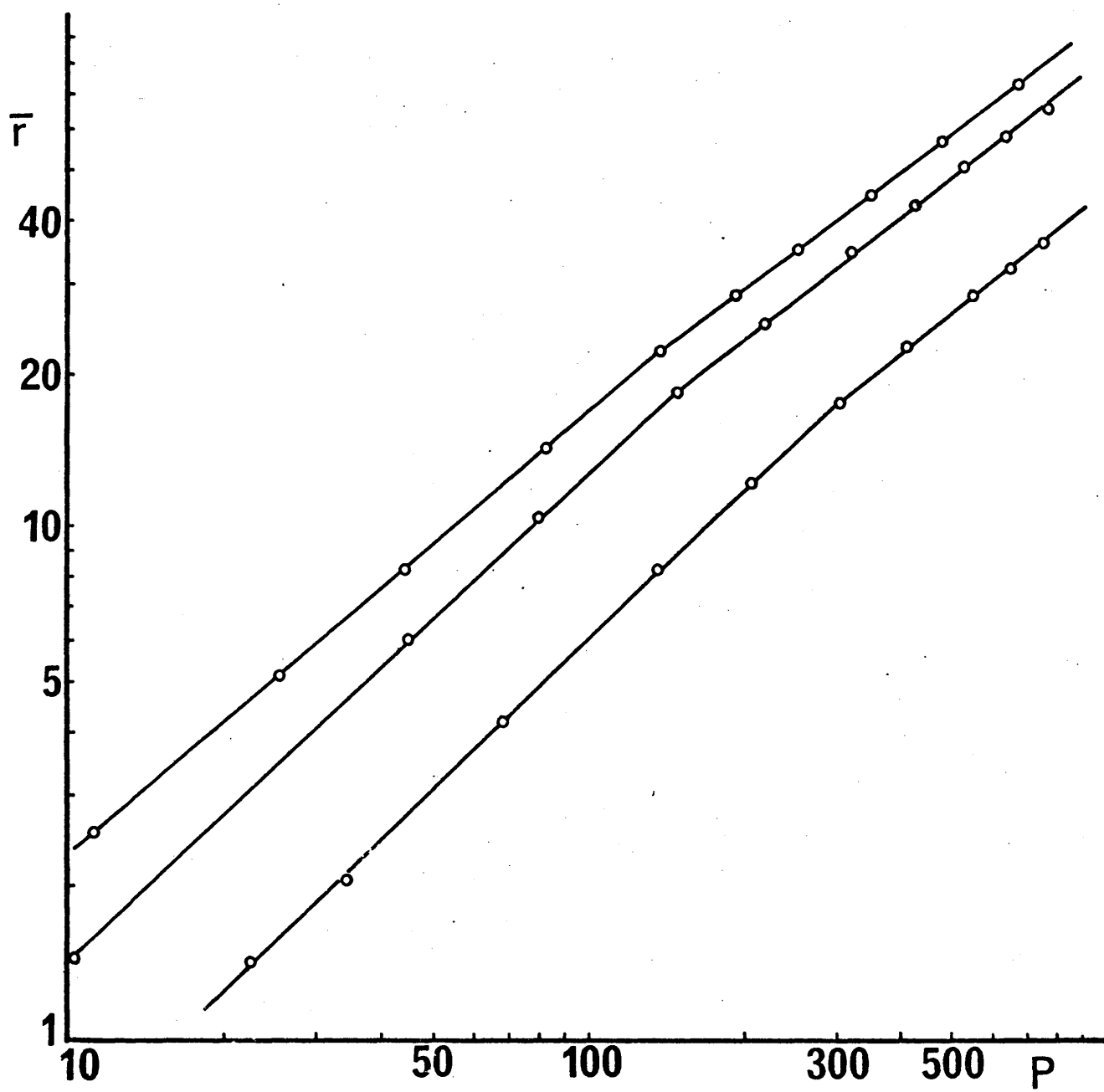


FIGURA 9-1

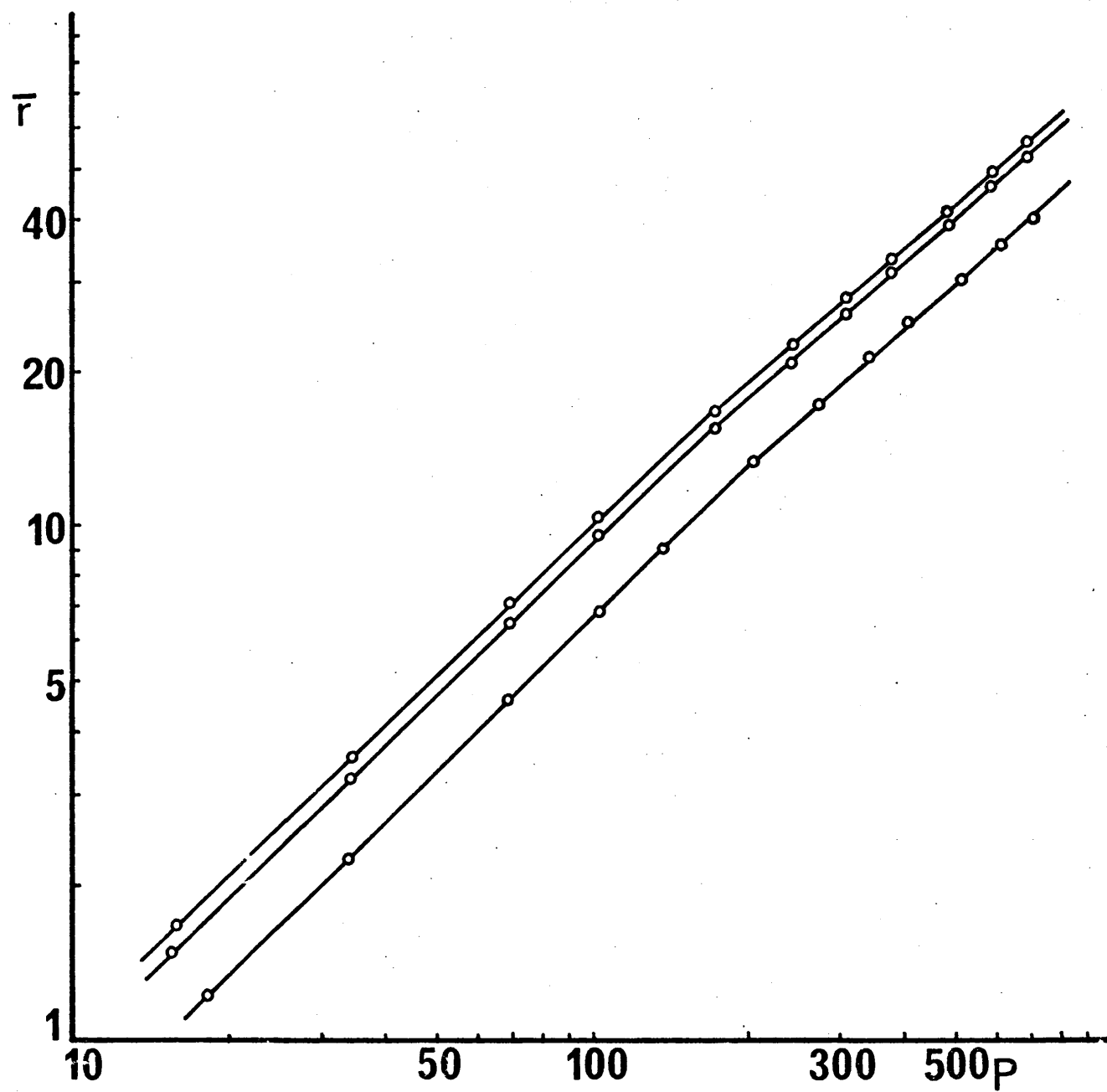


FIGURA 9-2

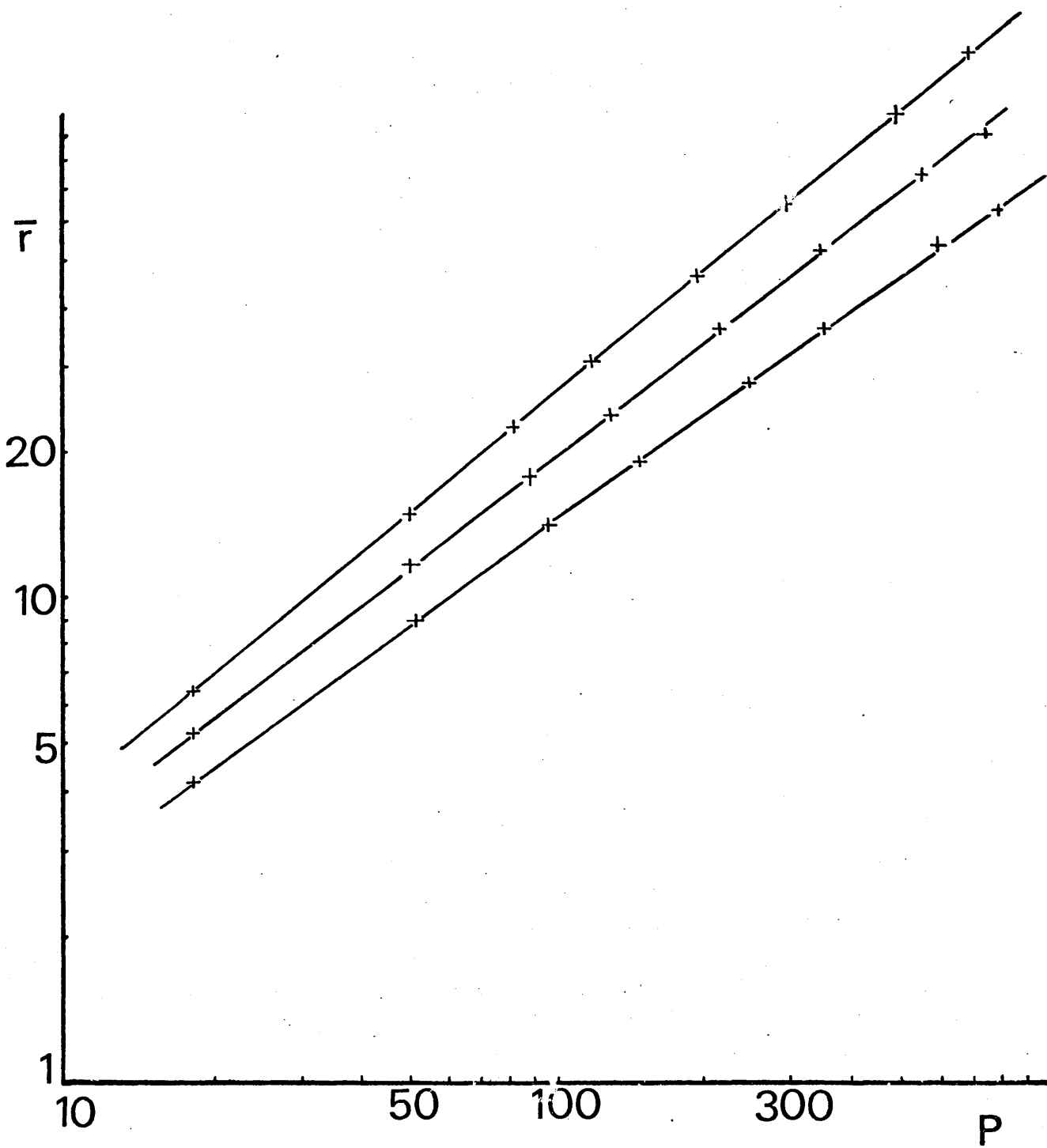


FIGURA 9-3



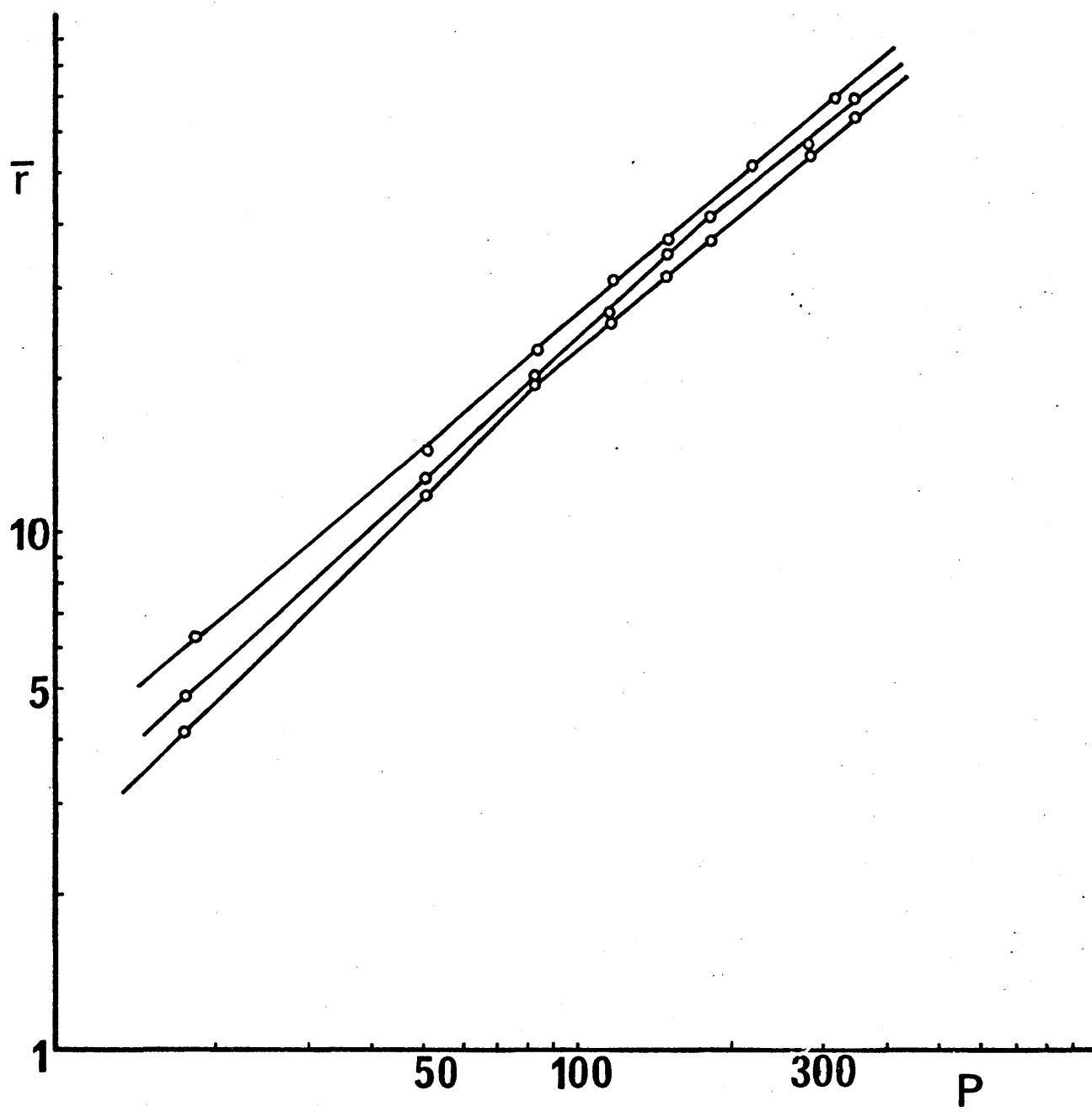


FIGURA 9-4

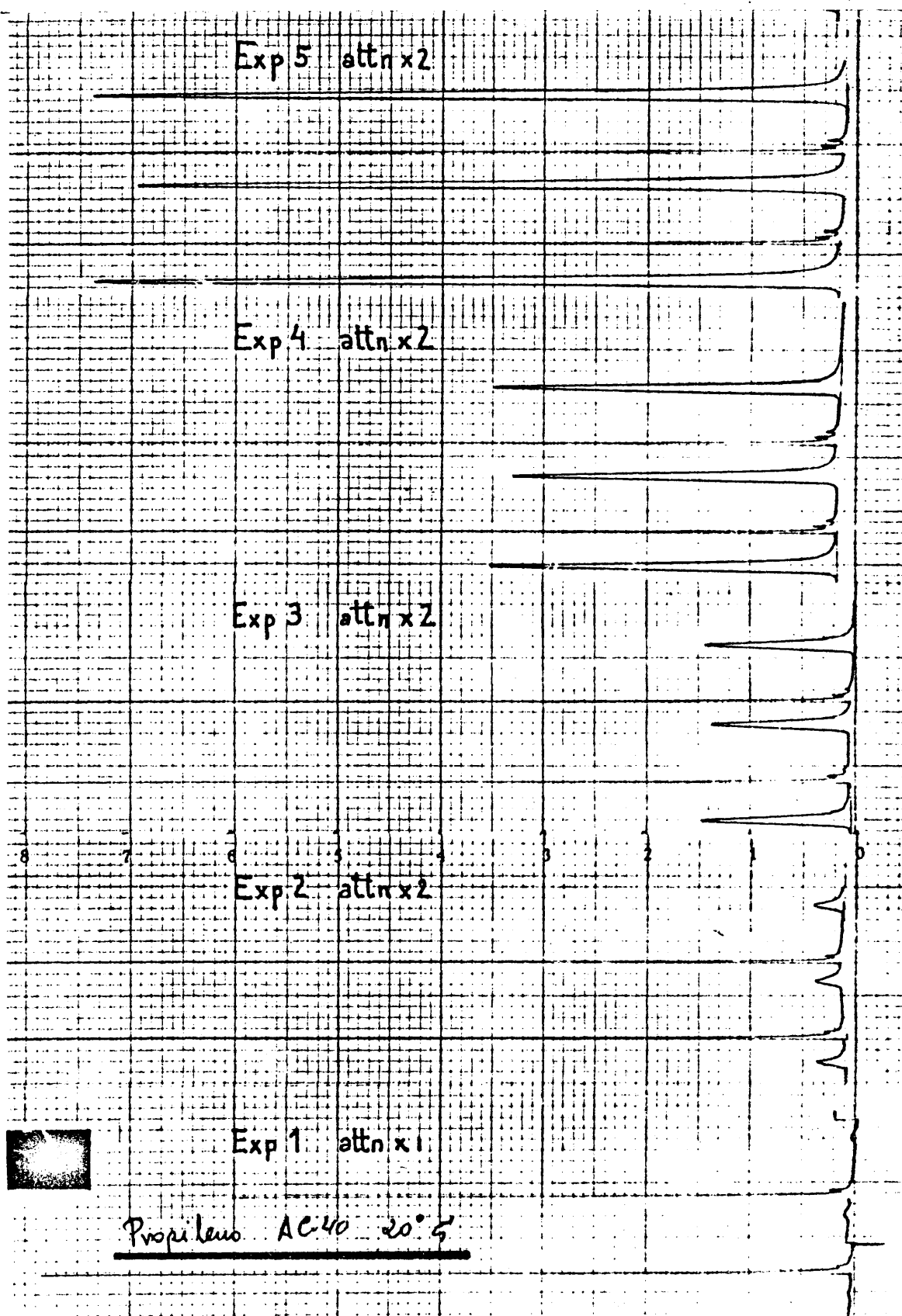


FIGURA 9-5

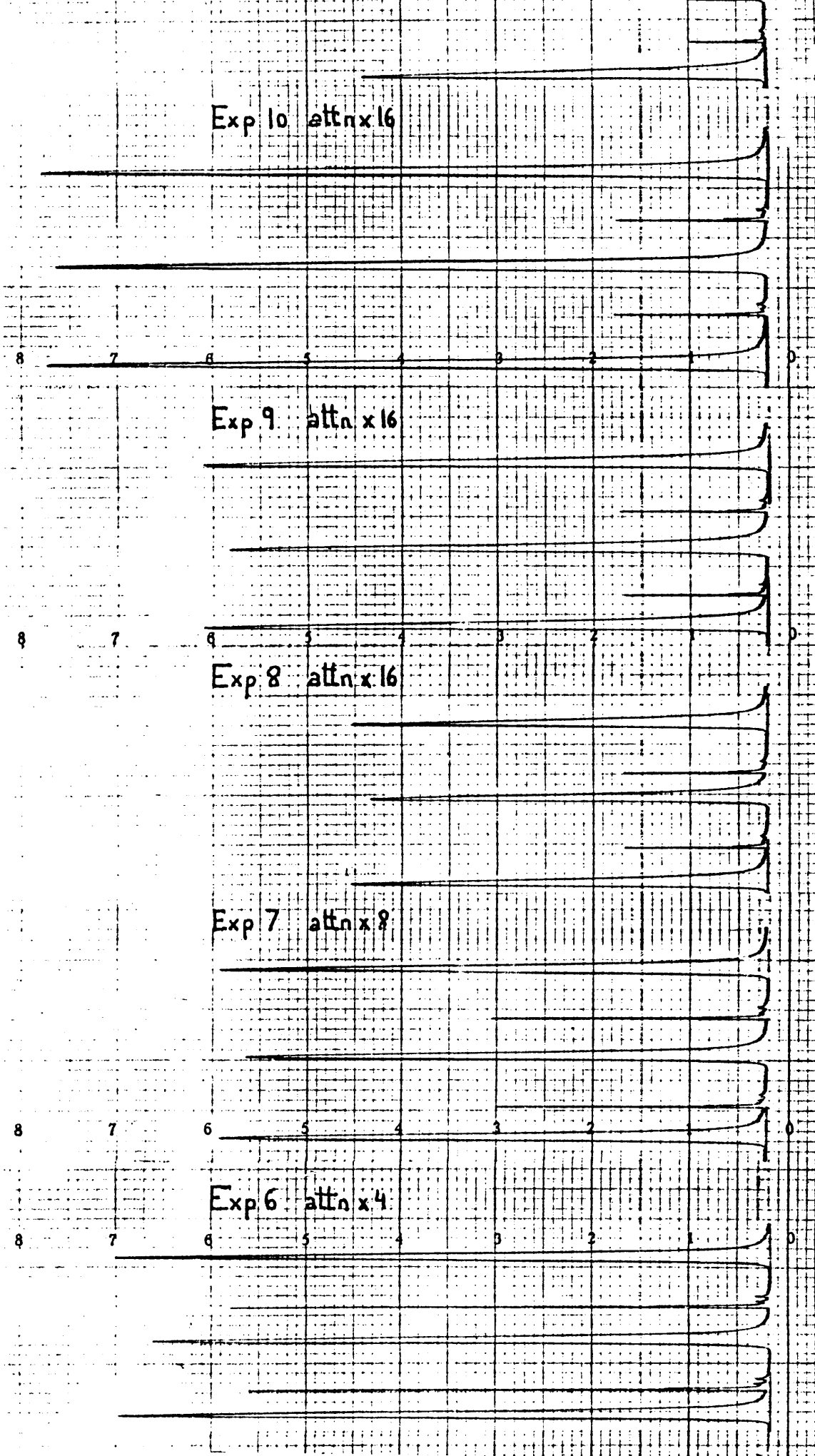


FIGURA -

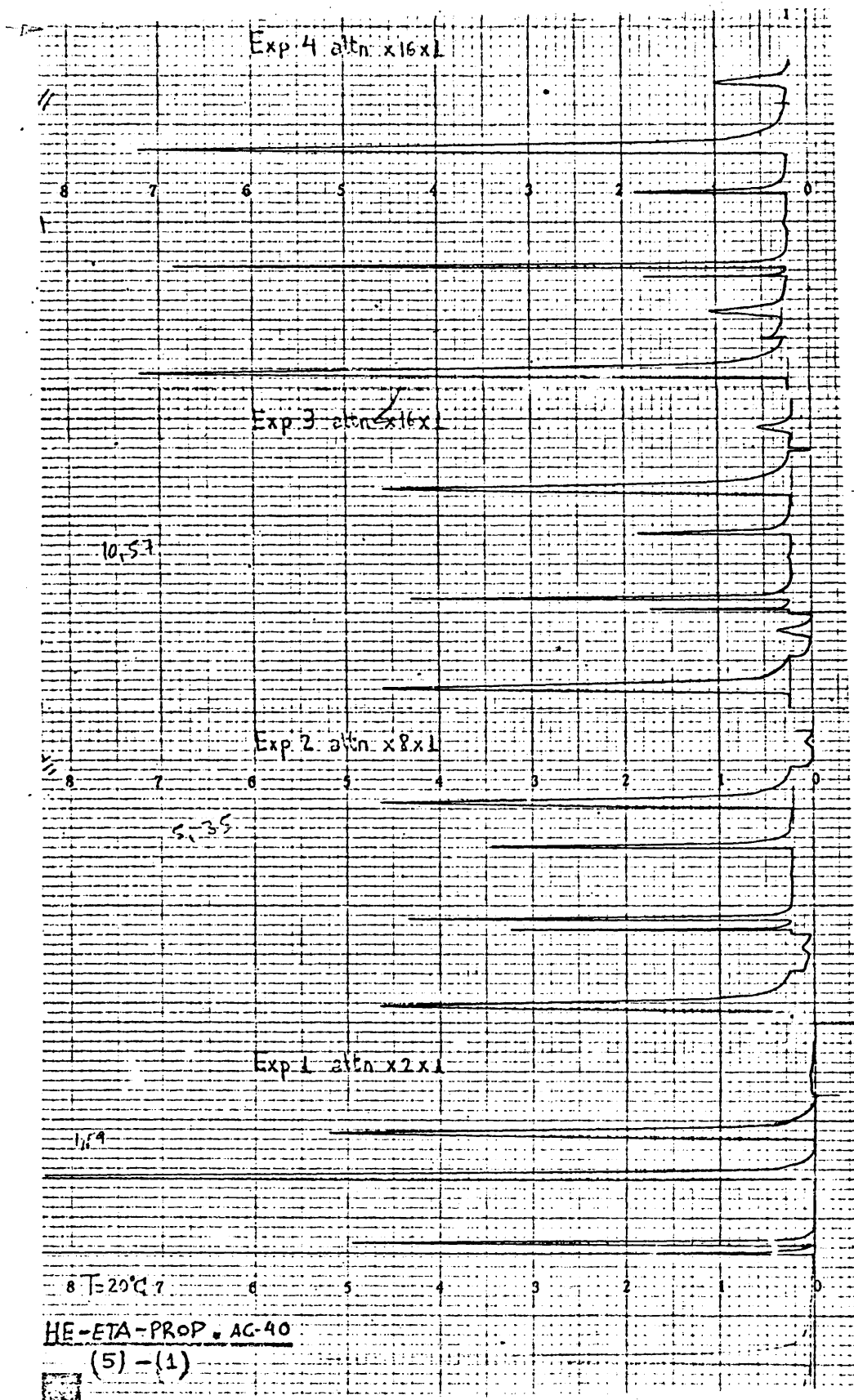


FIGURA 9-6

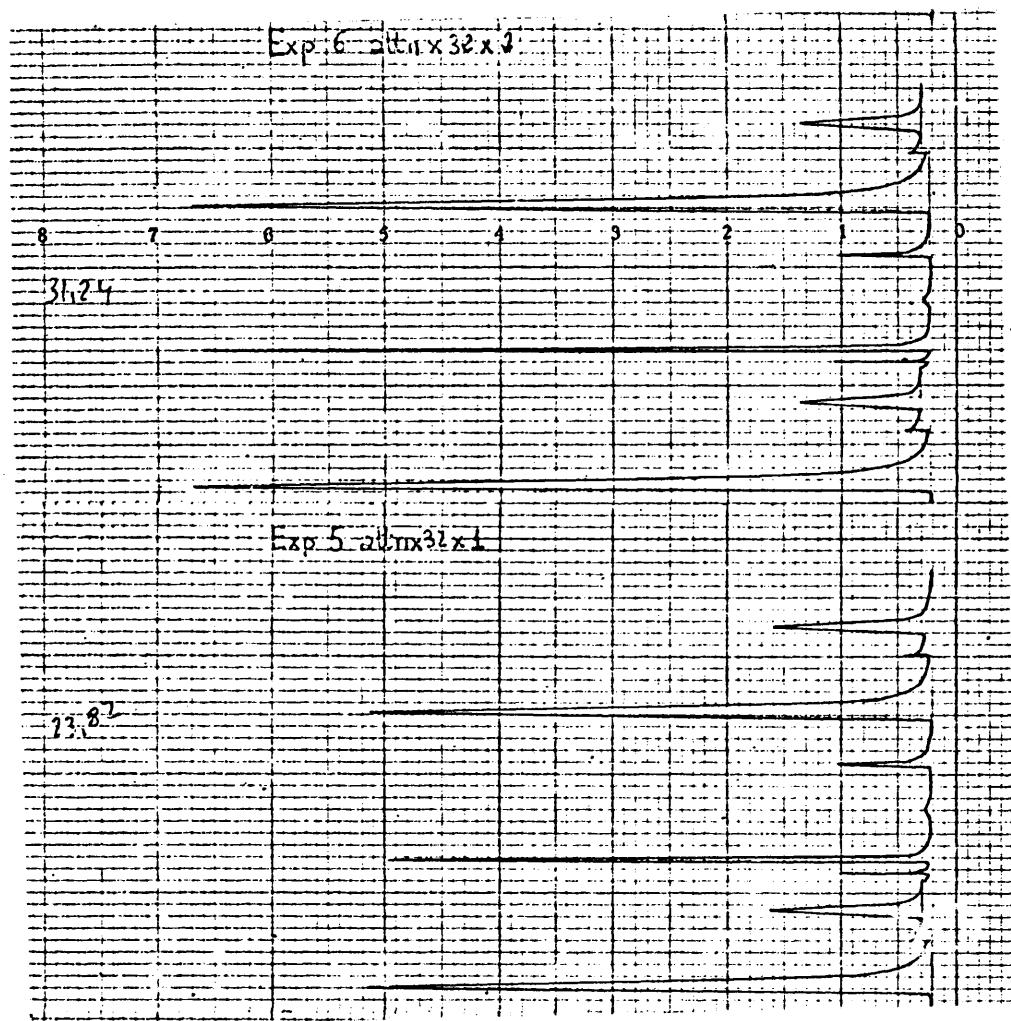


FIGURA 9-6 cont.

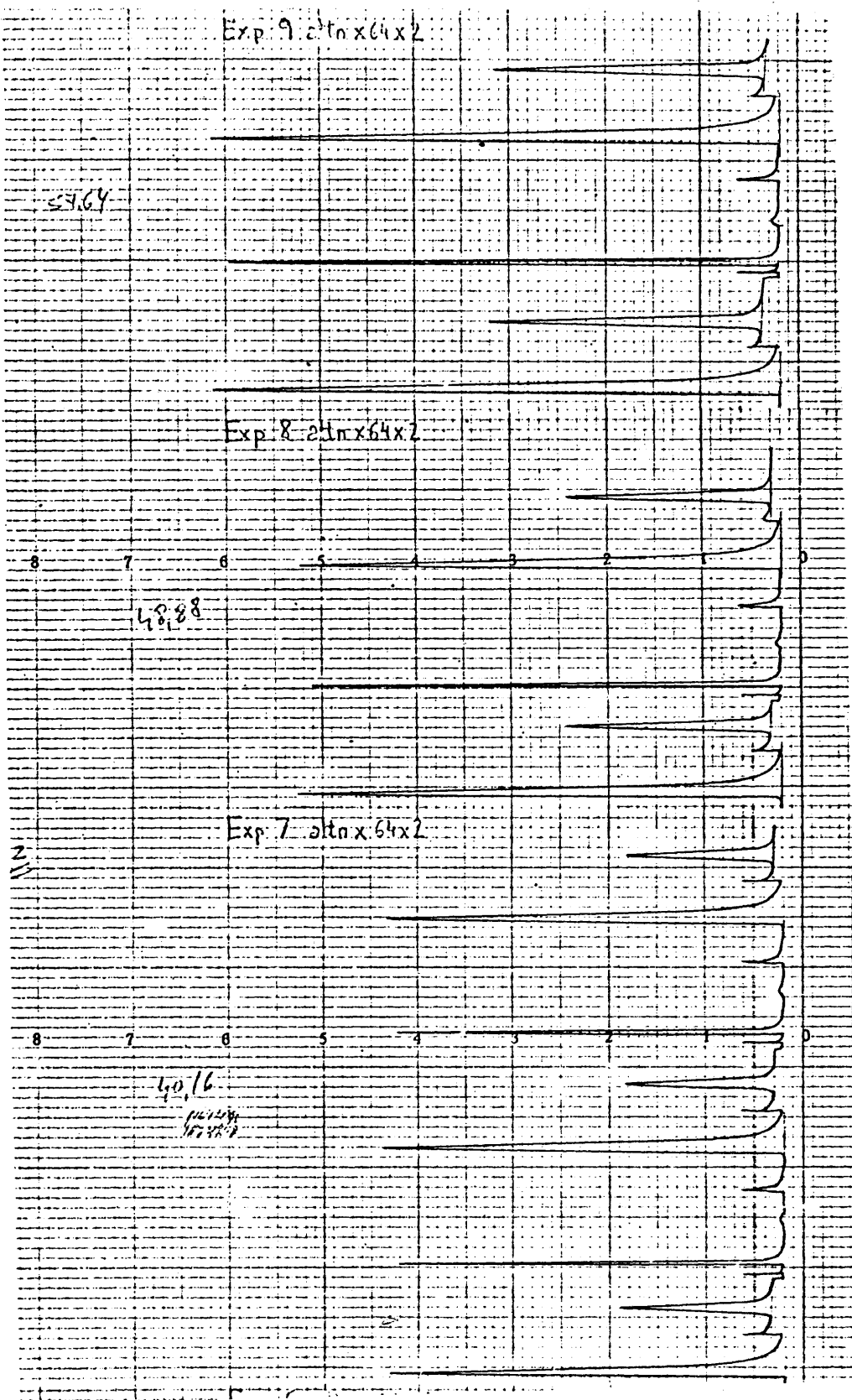


FIGURA 9-6 cont.

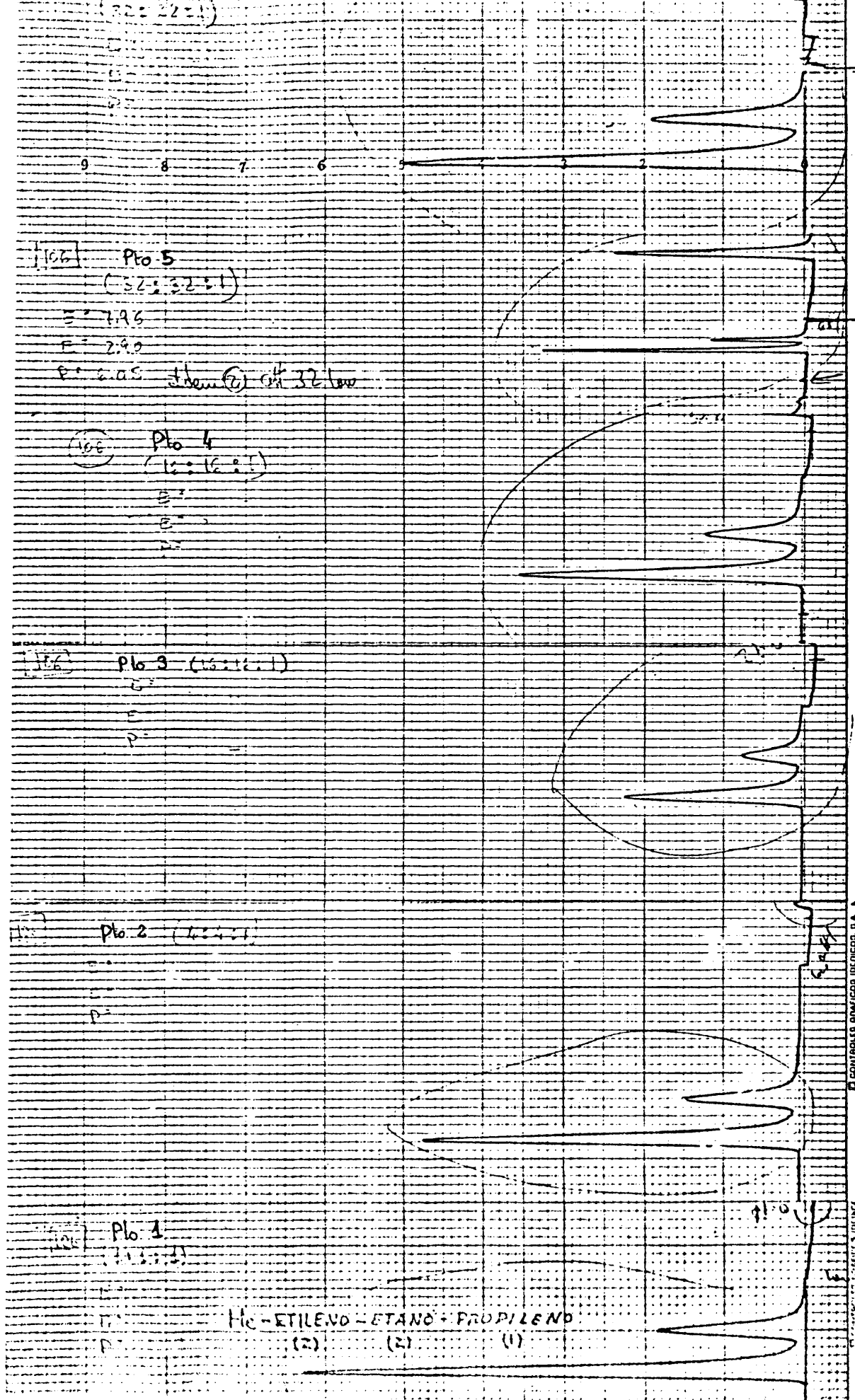


FIGURA 9-7

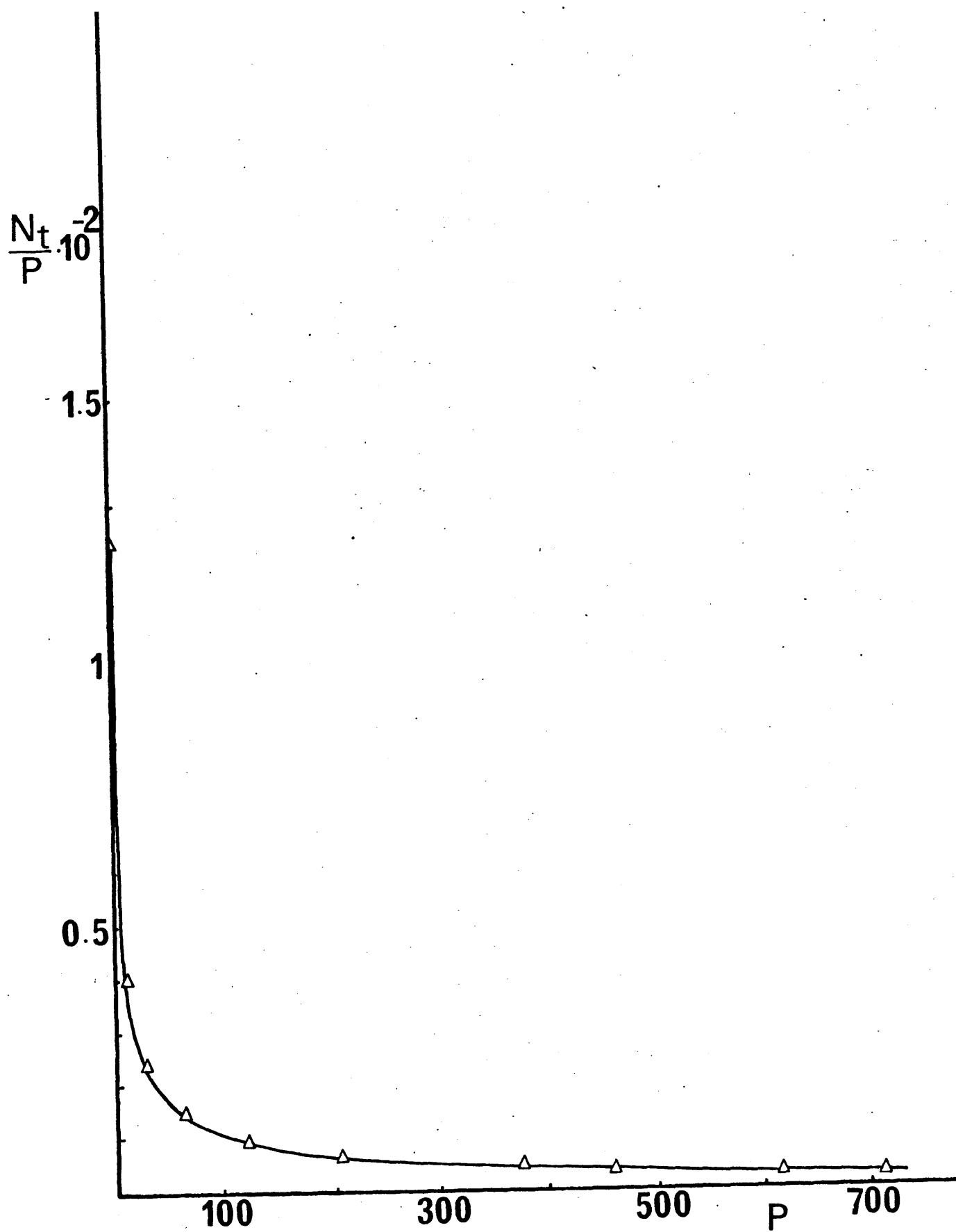


FIGURA 9-8



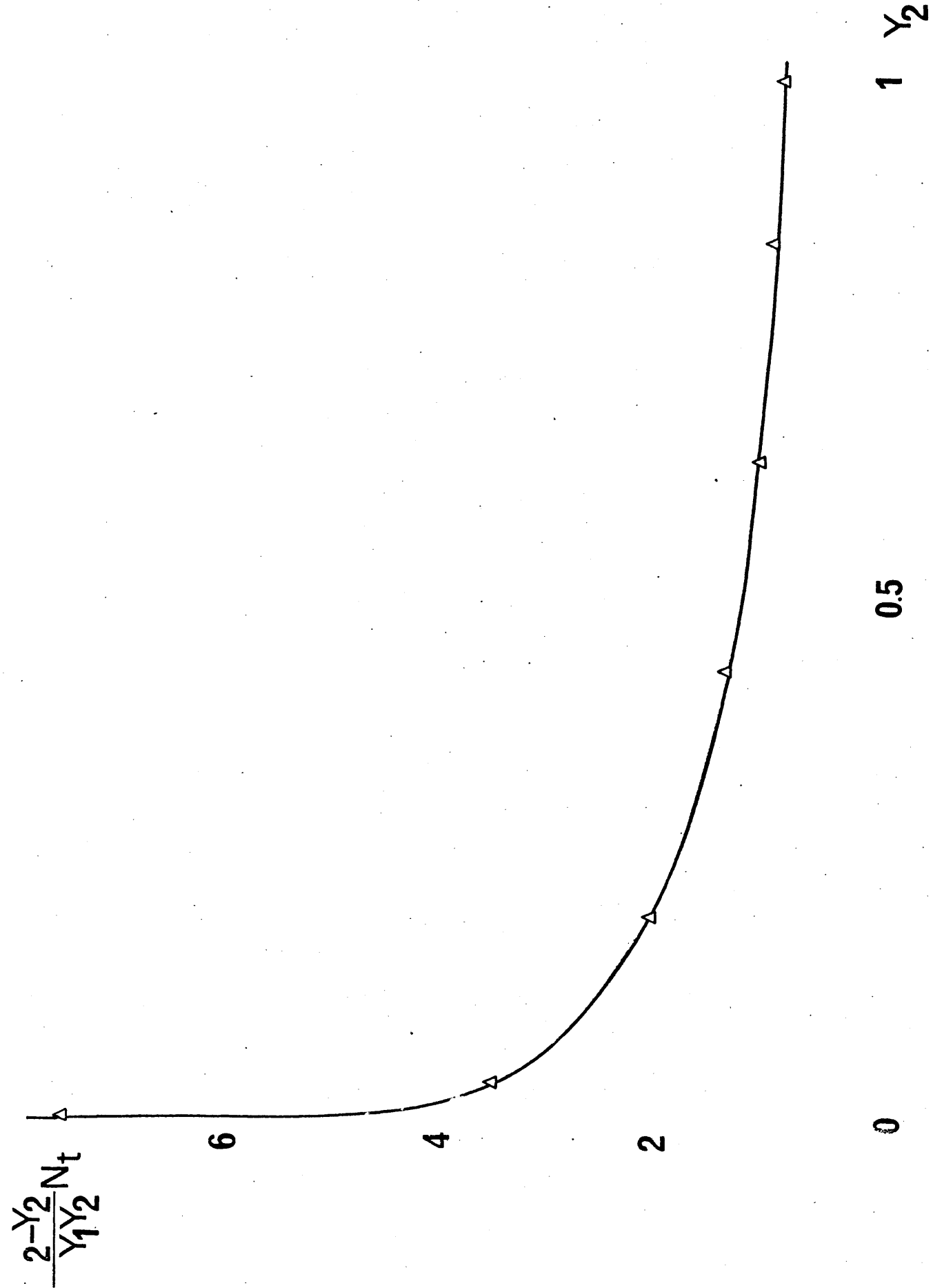


FIGURA 9-9

## BIBLIOGRAFIA

1. SCHOEN, H.M., "New Chemical Engineering Separation Techniques" Interscience (1962).
2. SKARSTROM, C.W., An. N. Y. Acad. Sci., 72, 751 (1959).
3. ROWSON, H.M., Brit. Chem. Eng., 8, 180 (1963).
4. FLEMING, J.B., GETTY, R., Chem. Eng. Albany, 71, 69 (1964).
5. KATTELL, S., Chem. Eng. Prog., 62, 67 (1966).
6. BROUGHTON, P.B., Chem. Eng. Prog., 64, 60 (1968).
7. CORTELYON, C.G., Chem. Eng. Prog., 65, 69 (1969).
8. SITTIG, M., Ind. Gases Man. and Aplic., Edit. NDC (1967).
9. SPODE, E., Kernerenergie, 1, 165 (1958).
10. KEILHOLTZ, G.W., ONRL-NSIC, 13 (1966).
11. ESHAYA, A.M., BNL-724 (1961).
12. ACKERMAN, F.J., UCRL-14990 (1965).
13. RAY, R.S., Radiochim. Act., 5, 30 (1966).
14. GARSIS, P.I., et al., Ind. Eng. Chem., 57, 27 (1965).
15. STERN, S.A., Jour. Vac. Sci. Techn., 2, 165 (1965).
16. WEINER, A.I., Hydroc. Proc., 45, 125 (1966).
17. FLEMING, J.B., Chem. Eng., 71, 69 (1964).
18. RAZONK, R.I., Jour. Phys. Chem., 69, 1805 (1965).
19. BARNEBY, H.L., Jour. Air Pol. Control Assoc., 15, 422, (1965).
20. JENCZEWSKI, T.J., et al., Ind. Eng. Chem. Fundam., 9, 2 (1970).
21. EBERLY, P.E., Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop., 10, 4 (1971).
22. RUTHVEN, D.M., Chem. Eng. Sci., 28, 701 (1973).

23. AMBROSE, D., GAS CHROMATOGRAPHY (1961).
24. KNOX, J.M., GAS CHOMATOGRAPHY (1962).
25. NOGARE, S., JUVET, R.S., GAS-LIQUID CHOMATOGRAPHY (1962).
26. PURNELL, H., GAS CHROMATOGRAPHY (1962).
27. CONDER, J.R., Advances in Anal.Chem. and Ind., 6, 209, (1968).
28. COSTA, E. y Col., An. Quim., 65, 1047 (1969).
29. COSTA, E. y Col., An. Quim., 71, 213 (1975).
30. COSTA, E. y Col., An. Quim., 71, 340 (1975).
31. HILL, T.L., J. Chem. Phis., 17, 520 (1949).
32. PRAUSNITZ, J.M., AICHE, J., 11, 1, 126 (1965).
33. VAN NESS, M.C., Ind. Eng. Chem. Fund., 8, 3, 464 (1969).
34. YOUNG, D.M., CRAVELL, A.D., "Physical Adsorption of Gases", Butterworths, limited London (1962).
35. MYERS, A.L., Ind. and Eng. Chem., 60, 5, 45 (1965).
36. SZEPESY, L., ILLES, V., Acta Chim. Hung., 35, 37 (1963).
37. FRIEDERICH, R., MULLIUS, J., Ind. Eng. Chem. Fundam., 11, 4, 439 (1972).
38. WILSON, G.M., J. Am. Chem. Soc., 86, 125 (1964).
39. FLORY, P.J., J. Chem. Phys., 9, 660 (1941).
40. HUGGINS, M.L., J. Chem. Phys., 9, 440 (1941).
41. HILDEBRAND, J.H., SCOTT, R.L., "Solubility of Liquids" 3°Ed., Reinhold Publ. Corp. (1950).
42. GUGGENHEIM, E.A., "Mixtures". Claredon Press Oxford (1952).
43. ABRAMS, D.S., PRAUSNITZ, J.M., AICHE J., 21, 116 (1975).
44. BONDI, A. "Physical Properties of Molecular Crystals Liquids and Glasses", Wiley N.Y. (1968).
45. BRUNAGUER, F., J. Amer. Chem. Soc., 62, 1723 (1940).
46. LEWIS, W.K., Ind. and Eng. Chem., 42, 7, 1326 (1950).